

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПРИЗЕМЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

д. т. н. С. П. Гулевич, к. т. н. Ю. Г. Веселов

*Вопросы определения посадочных характеристик беспилотных летательных аппаратов, оснащенных парашютно-реактивной системой посадки, представляют серьезную научно-техническую проблему. В статье освещен важнейший аспект данной проблемы - задача определения их скорости приземления.*

Под скоростью приземления беспилотного летательного аппарата (БЛА) понимается вертикальная скорость его движения в момент контакта его силовых опорных элементов с поверхностью земли. Так как определить скорость приземления экспериментальными методами практически невозможно, она определяется расчетным путем, используя технические характеристики элементов системы посадки (тягу двигателя мягкой посадки (ДМП), время работы ДМП, длину щупов - высоту включения ДМП).

Скорость приземления БЛА определяется решением системы уравнений, описывающих траекторию движения центра масс БЛА на участке приземления [1]:

$$\begin{cases} m\dot{V} = mg - X_a - P_{\text{ДМП}} & (1) \\ \dot{H} = -V_y, & (2) \end{cases}$$

где  $X_a$  - сила лобового сопротивления БЛА и парашютной системы;

$P_{\text{ДМП}}$  - тяга ДМП.

Уравнения (1 и 2) в общем случае могут быть решены методами численного интегрирования. Достаточно точное аналитическое решение можно получить из следующих соображений.

Участок приземления занимает сравнительно непродолжительное время, высота полета  $H$  за время приземления изменяется также незначительно (1 - 2 м). Поэтому плотность воздуха  $\rho$ , силу тяги ДМП  $P_{\text{ДМП}}$  можно считать постоянными и равными их значениям ( $\rho_0, P_{\text{ДМП.0}}$ ) на высоте площадки посадки относительно уровня моря.

Скорость полета и число  $M$  полета БЛА на участке приземления невелики. Это позволяет с достаточной степенью точности принять

коэффициент лобового сопротивления БЛА и парашюта  $C_x = const$ , то есть пренебречь влиянием сжимаемости воздуха на поляру БЛА.

Ускорение БЛА  $\dot{V}$  можно представить в виде:

$$\dot{V} = \frac{dV}{dH} \frac{dH}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dV^2}{dH}.$$

Подставив это выражение в уравнение (1), получим:

$$\frac{mg}{2} \frac{dV^2}{dH} - C_x S \frac{\rho_0}{2} V^2 + (mg - P_{ДМП.0}) = 0, \quad (3)$$

где  $S$  - площадь парашютной системы и БЛА.

При сделанных выше допущениях уравнение (3) представляет собой линейное дифференциальное уравнение относительно неизвестной  $V^2$ . Решение этого дифференциального уравнения имеет вид:

$$V^2 = \frac{2(mg - P_{ДМП.0})}{C_x S \rho_0} + C e^{-g \frac{C_x S \rho_0 H}{mg}}. \quad (4)$$

Определим постоянную интегрирования  $C$  из того условия, что при  $H=0$  скорость  $V=V_{y.np}$ .

Подставив значение постоянной интегрирования  $C$  в уравнение (4) получим следующее выражение скорости снижения в зависимости от высоты полета ( $V=V_{y.0}$ ):

$$V_{y.0}^2 = \frac{2(mg - P_{ДМП.0})}{C_x S \rho_0} \left( 1 - e^{-g \frac{C_x S \rho_0 H}{mg}} \right) + V_{y.np}^2 e^{-g \frac{C_x S \rho_0 H}{mg}}.$$

Решим это уравнение относительно  $V_{y.np}$  (приняв во внимание что при установившейся скорости  $V_{y.0}$  справедливо выражение  $C_x \frac{\rho V_{y.0}^2}{2} S = mg$ ):

$$V_{y.np} = V_{y.0} \sqrt{\frac{n_{y.0} + (1 - n_{y.0}) e^{\frac{2gH}{V_{y.0}^2}}}{e^{\frac{2gH}{V_{y.0}^2}}}},$$

где  $n_{y.0}$  - вертикальная составляющая перегрузки, создаваемая ДМП, в земной системе координат;

$H$  - высота включения ДМП (рабочая длина щупа), то есть путь, пройденный БЛА за время работы ДМП.

В общем случае  $n_{y.0}$  является функцией трех составляющих перегрузки по связанным осям и двух углов (крена и тангажа), определяющих положение БЛА в земной системе координат:

$$n_{y.0} = n_y \cos \vartheta \cos \gamma + n_x \sin \vartheta - n_z \sin \gamma,$$

где  $n_y, n_x, n_z$  - составляющие перегрузки по связанным осям.

Поскольку в процессе спуска на парашюте углы тангажа и крена не велики, а боковые перегрузки в связанной системе координат значительно меньше вертикальной составляющей перегрузки, то приближенно можно считать  $n_{y.0} \approx n_y$ .

Технические характеристики ДМП (суммарный импульс тяги, тяга по оси корпуса двигателя в функции времени и температуры наружного воздуха, время горения заряда в функции температура и т.д.) приводятся в Руководстве по технической эксплуатации конкретного типа БЛА.

Скорость снижения  $V_{y.o.}$  (вертикальная скорость движения БЛА относительно поверхности земли на парашюте до момента включения ДМП) легко определяется традиционными экспериментальными методами, основным из которых является метод дифференцирование высоты по времени:

$$V_{y.o.} = \frac{dH}{dt} = \frac{H(t + \Delta t) - H(t)}{\Delta t}.$$

Определение скорости снижения БЛА методом дифференцирования высоты по времени осуществляется по данным внешне-траекторных и радиотелеметрических измерений.

Установившуюся скорость снижения БЛА на парашюте можно также определить по формуле:

$$V_{y.o.} = \sqrt{\frac{2mg}{(C_{x.n} S_n + C_{x.БЛА} S_{БЛА})\rho}},$$

где  $C_{x.n.}$  и  $C_{x.БЛА}$  - коэффициент сопротивления парашютной системы и БЛА соответственно;

$S_n$  и  $S_{БЛА}$  - площадь парашютной системы и БЛА соответственно;

$m$  - масса БЛА;

$\rho$  - плотность воздуха.

График зависимости скорости приземления БЛА ТУ-143 от скорости снижения на парашюте и величины нормальной перегрузки представлен на рис. 1.

Полная скорость приземления БЛА определяется выражением:

$$V_{np} = \sqrt{V_{y.np.}^2 + W_в^2},$$

где  $W_в$  - скорость ветра.

Вертикальная скорость приземления  $V_{y.np.}$  сравнивается с заданной по ТУ на изготовление систем посадки, которая, как правило, для БЛА многоцелевого применения без дополнительных амортизирующих устройств составляет не более 3 м/с.

Методика определения посадочных характеристик БЛА реализована в виде графоаналитического метода, посредством которого можно оперативно, с достаточной степенью достоверности, определить необходимые характеристики.

Зависимости  $\rho(H)$ ,  $V_{y.o.}(\rho)$ ,  $V_{y.np.}(V_{y.o.}, n_y)$ ,  $V_{np.}(V_{y.np.}, W_в)$ ,  $\theta(V_{y.np.}, W_в)$ , образующие графоаналитический метод определения посадочных характеристик БЛА ТУ-143 на участке приземления, представлены на рис. 2.

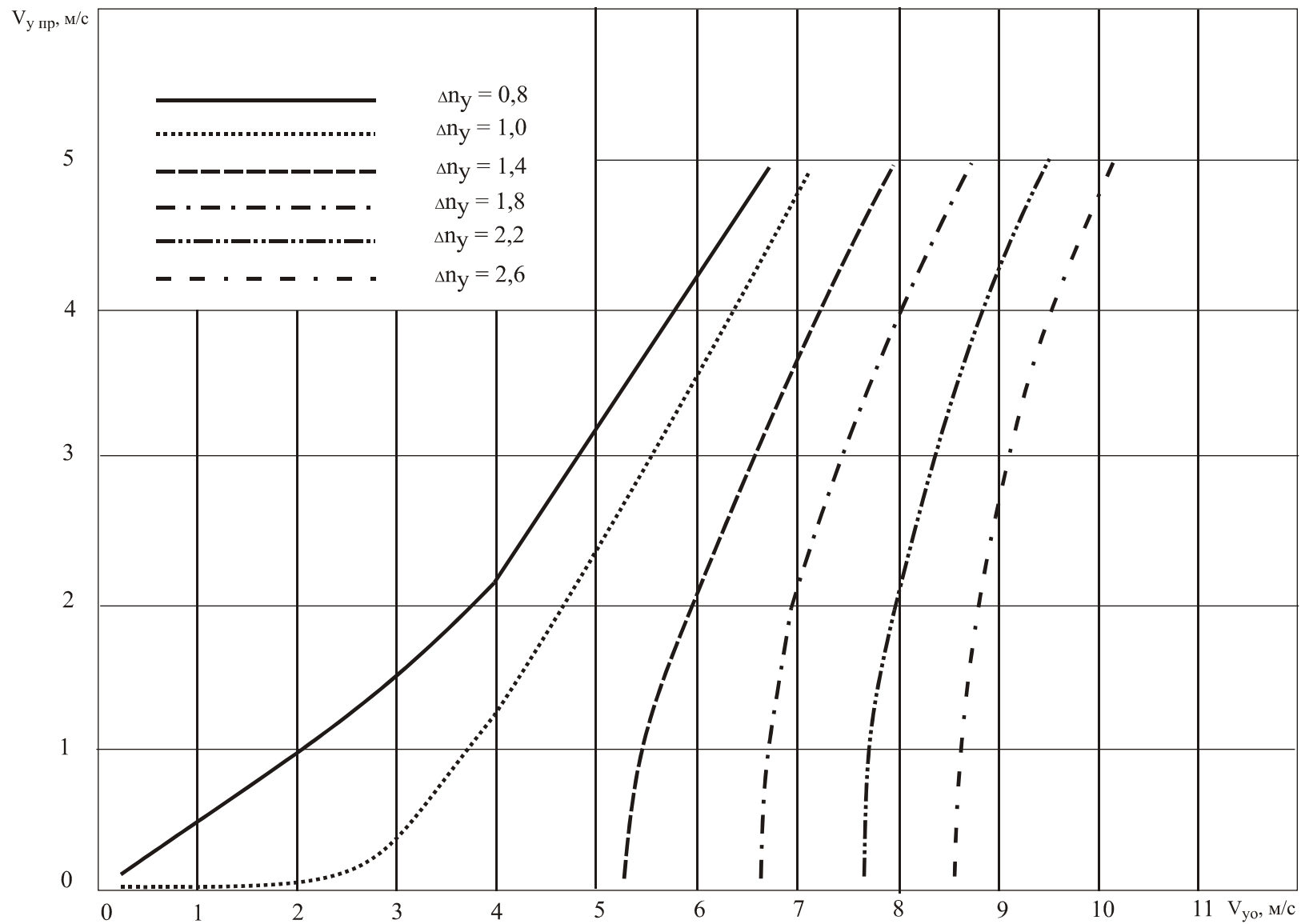


Рис. 1. График зависимости скорости приземления БЛА ТУ - 143 от скорости снижения на парашюте и величины нормальной перегрузки

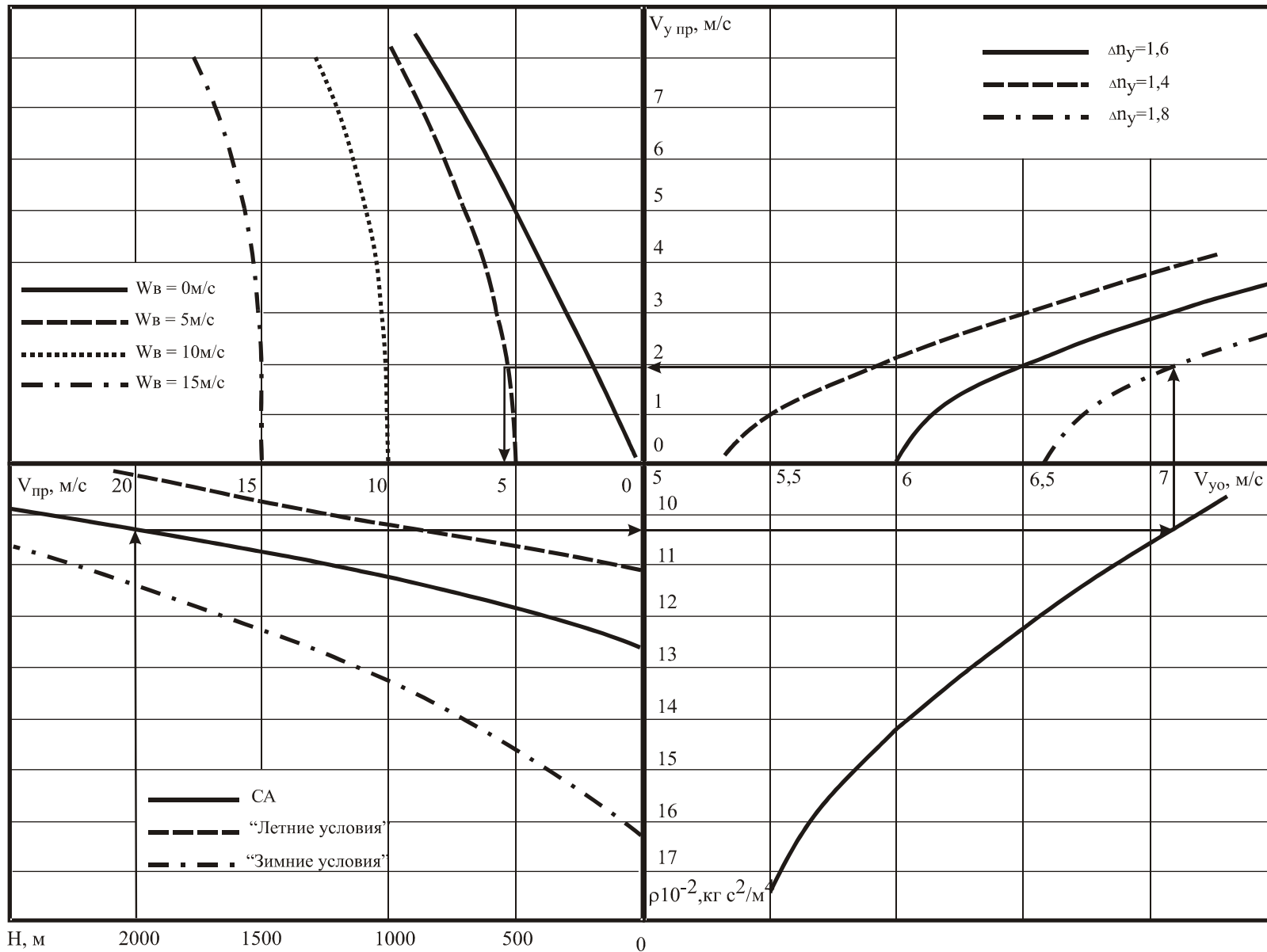


Рис. 2. Графоаналитический метод определения посадочных характеристик БЛА ТУ-143

## **Литература**

1. *Острославский И. В., Стражева И. В.* Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. – М.: Оборониздат, 1963. – 430 с.