

УДК 629.125.6.015

EDN: IARYBO

Ю.Ф. Орлов
ПРОДОЛЬНАЯ ОСТОЙЧИВОСТЬ ЭКРАНОПЛАНА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлена математическая модель начальной продольной остойчивости экраноплана. Показано, что аналогом допущения о равнообъемных наклонениях классической теории корабля является введение в задачу коэффициента связанности перемещений (изменение высоты полета и угла дифферента (тангажа)). Для приближенного учета влияния турбулентной струи от движителей на подъемную силу крыла вблизи опорной поверхности используется предположение о том, что главная часть в выражении для подъемной силы может быть определена из гидравлической задачи о течении в щели, образованной плоским экраном и несущей поверхностью, обдуваемой турбулентной струей от работающего движителя. Выполнены расчеты условной метацентрической высоты и плеча остойчивости для экраноплана «Орленок» в зависимости от угла тангажа для различных значений скорости полета, массы экраноплана, угла отклонения закрылка. Выполнена оценка доли поддувной части подъемной силы в зависимости от скорости, высоты полета, угла отклонения закрылка

Ключевые слова: экраноплан, поддув под крыло, продольная остойчивость, низколетящее крыло, условная метацентрическая высота, плечо остойчивости.

Экраноплан классифицируется как скоростное морское судно с динамическим принципом поддержания (СДПП), что обуславливает необходимость выполнения требований *Правил классификации и постройки морских и речных судов*. В связи с этим, представляет интерес анализ некоторых мореходных качеств экранопланов с позиций теории корабля. В настоящей работе рассматривается и анализируется с позиции теории корабля математическая модель продольной остойчивости экраноплана. Ранее эти вопросы рассматривались для абстрактной системы несущих поверхностей [1, 2].

1. Математическая модель продольной остойчивости экраноплана

Уравнения Лагранжа 2-го рода продольного движения летательного аппарата в скоростной системе координат имеют вид [3]:

$$\begin{aligned} m\dot{V} &= X - G \sin \theta; \\ mV\dot{\theta} &= Y - G \cos \theta; \\ J_Z\ddot{\vartheta} &= M_Z; \\ \dot{h} &= V \sin \theta; \vartheta = \theta + \alpha, \end{aligned} \quad (1)$$

где V – скорость движения; θ – угол наклона траектории движения аппарата; ϑ – угол тангажа; α – угол атаки; h – высота полета; $G = mg$ – вес и масса аппарата; X , Y и M_Z – проекции сил на оси OX , OY и момент сил относительно оси OZ ; J_Z – момент инерции массы аппарата относительно оси OZ ; $(\dot{\quad}) = \frac{\partial(\quad)}{\partial t}$; t – время.

В стационарном горизонтальном движении суммы сил по осям X , Y , момент относительно оси Z и угол наклона траектории θ равны нулю:

$$X = 0; Y = G; M_Z = 0; \theta = 0.$$

Рассматривая далее возмущения продольного стационарного горизонтального полета, обычным путем [1-3] можно получить систему линеаризованных дифференциальных уравнений возмущенного продольного движения (предлагается, что $\Delta V = 0$):

$$\begin{aligned} \Delta\ddot{h} &= \Delta\ddot{Y}; \\ \Delta\ddot{\vartheta} &= \Delta\ddot{m}_Z; \\ \Delta\dot{h} &= Fr\Delta\theta; \\ \Delta\alpha &= \Delta\vartheta - \Delta\theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta \bar{h} = \Delta h/L$ – безразмерное приращение высоты полета; $\Delta \bar{Y}$, $\Delta \bar{m}_z$ – безразмерные приращения силы и момента; $Fr = V/\sqrt{gL}$ – число Фруда по характерной длине L ; $(\dot{}) = \frac{\partial()}{\partial \tau}$; $(\ddot{}) = \frac{\partial^2()}{\partial \tau^2}$; $\tau = \frac{t}{\sqrt{L/g}}$ – безразмерное время.

Приращение сил и момента можно определить зависимостями

$$\begin{aligned} \Delta \bar{Y} &= \bar{Y}^F \Delta Fr + \bar{Y}^\alpha \Delta \alpha + \bar{Y}^\vartheta \Delta \vartheta + \bar{Y}^h \Delta \bar{h} + \\ &+ \bar{Y}^{\dot{F}} \Delta \dot{F} r + \bar{Y}^{\dot{\alpha}} \Delta \dot{\alpha} + \bar{Y}^{\dot{\vartheta}} \Delta \dot{\vartheta} + \bar{Y}^{\dot{h}} \Delta \dot{\bar{h}} + \dots; \\ \Delta \bar{m}_z &= \bar{m}_z^F \Delta Fr + \bar{m}_z^\alpha \Delta \alpha + \bar{m}_z^\vartheta \Delta \vartheta + \bar{m}_z^h \Delta \bar{h} + \\ &+ \bar{m}_z^{\dot{F}} \Delta \dot{F} r + \bar{m}_z^{\dot{\alpha}} \Delta \dot{\alpha} + \bar{m}_z^{\dot{\vartheta}} \Delta \dot{\vartheta} + \bar{m}_z^{\dot{h}} \Delta \dot{\bar{h}} + \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

где верхний индекс есть знак частной производной по этой величине. Особенностью экранопланов является наличие в выражениях для сил и момента в (3) зависимости их от угла тангажа. Это связано с тем, что несущие элементы экраноплана для разных значений угла тангажа ϑ будут находиться в различном положении относительно экрана. В самом деле, в уравнениях динамики независимая переменная \bar{h} – относительное отстояние центра масс аппарата от экрана – используется для определения отстояния конкретного несущего элемента h_k по формуле

$$h_k = h + r_k \sin \vartheta \approx h + r_k \vartheta, \quad (4)$$

где r_k – расстояние от центра масс до точки приложения силы на несущем элементе (или точки, относительно которой определена зависимость момента элемента). Поэтому в выражениях (3) производные по углу тангажа (и по его производным) имеют для каждого элемента такой смысл

$$\frac{\partial}{\partial \vartheta} = r_k \frac{\partial}{\partial h_k}; \quad \frac{\partial}{\partial \dot{\vartheta}} = r_k \frac{\partial}{\partial \dot{h}_k}; \quad \dots$$

В [4] этот факт не учтен, в связи с чем некоторые результаты и выводы работы [4] (особенно для экранопланов схемы угла) являются ошибочными. Характеристическое уравнение системы дифференциальных уравнений (2) имеет вид [1]:

$$P^4 + A_3 p^3 + A_2 p^2 + A_1 p + A_0 = 0, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} A_0 &= \bar{Y}^h (\bar{m}_z^\alpha + \bar{m}_z^\vartheta) - \bar{m}_z^h (\bar{Y}^\alpha + \bar{Y}^\vartheta); \\ A_1 &= -\frac{1}{F} \bar{Y}^\alpha \bar{m}_z^\vartheta + \frac{1}{F} \bar{Y}^\vartheta \bar{m}_z^\alpha + \bar{Y}^h (\bar{m}_z^\vartheta + \bar{m}_z^\alpha); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_2 &= -\bar{Y}^h - \frac{1}{F} \bar{m}_z^\vartheta \bar{Y}^\alpha - \bar{m}_z^\alpha - \bar{m}_z^\vartheta; \\ A_3 &= \frac{1}{F} \bar{Y}^\alpha - \bar{m}_z^\vartheta - \bar{m}_z^\alpha. \end{aligned}$$

Для экранопланов почти всегда выполняются неравенства

$$A_1 > 0, A_2 > 0, A_3 > 0. \quad (6)$$

Исходя из этого, единственным условием устойчивости, и при том асимптотической, решений системы уравнений (2) будет неравенство

$$A_0 > 0. \quad (7)$$

Колебательная устойчивость решений определяется условием

$$A_3 A_2 A_1 - A_3^2 A_0 - A_1^2 > 0. \quad (8)$$

Преобразуем выражение для A_0 . В стационарном движении (горизонтальный полет) угол наклона траектории $\Theta = 0$, в связи с чем $\alpha = \vartheta$ и в выражении для A_0 можно положить $\frac{\partial}{\partial \alpha} = \frac{\partial}{\partial \vartheta}$. Тогда

$$A_0 = \bar{Y}^h 2\bar{m}_z^\vartheta - \bar{m}_z^h 2\bar{Y}^\vartheta = 2\bar{Y}^h \bar{Y}^\vartheta \left(\frac{\bar{m}_z^\vartheta}{\bar{Y}^\vartheta} - \frac{\bar{m}_z^h}{\bar{Y}^h} \right) = -2\bar{Y}^h \bar{Y}^\vartheta (f^{(h)} - f^{(\vartheta)}), \quad (9)$$

где $f^{(h)} = \left(\frac{\partial \bar{m}_z}{\partial \bar{h}} \right) / \left(\frac{\partial \bar{Y}}{\partial \bar{h}} \right)$ – фокус аппарата по отстоянию;

$f^{(\vartheta)} = \left(\frac{\partial \bar{m}_z}{\partial \vartheta} \right) / \left(\frac{\partial \bar{Y}}{\partial \vartheta} \right)$ – фокус аппарата по углу тангажа.

Поскольку обычно $\frac{\partial \bar{Y}}{\partial h} < 0$ и $\frac{\partial \bar{Y}}{\partial \alpha} > 0$, то условие (7) с учетом (9) трактуется так: экраноплан устойчив, если фокус по отстоянию находится впереди фокуса по тангажу.

Рассмотрим теперь устойчивость продольного движения экраноплана с позиций теории корабля [4]. Метацентрическая формула остойчивости имеет вид:

$$M_{z\theta} = GN\psi, \quad (10)$$

где $M_{z\theta}$ – восстанавливающий момент при дифференте аппарата на угол ψ , причем $\psi = -\vartheta$, так как традиционно в теории корабля положительным считается дифферент на нос: H – продольная условная метацентрическая высота. В соответствии с (10) условную метацентрическую высоту можно определить как величину, пропорциональную отношению приращения восстанавливающего момента $\Delta M_{z\theta}$ к приращению угла дифферента $\Delta\psi$

$$H = \frac{1}{G} \cdot \frac{\Delta M_{z\theta}}{\Delta\psi}, \quad (11)$$

Выполнение соотношений (10) и (11) предполагает выполнение условий равновесия

$$\Delta X = 0; \Delta Y = 0; \Delta M_{z\theta} = \Delta M_{z\theta}, \quad (12)$$

где ΔX , ΔY – приращения горизонтальных и вертикальных сил; $\Delta M_{z\theta}$ – дифферентующий момент.

Аналогично (3), можно представить приращение ΔY и $\Delta M_{z\theta}$ усеченными разложениями в ряд Тейлора

$$\begin{aligned} \Delta Y &\approx Y^\alpha \Delta\alpha + Y^h \Delta h + Y^\psi \Delta\psi; \\ \Delta M_{z\theta} &\approx m_z^\alpha \Delta\alpha + m_z^h \Delta h + m_z^\psi \Delta\psi \end{aligned} \quad (13)$$

В горизонтальном установившемся движении $\Delta\alpha = \Delta\vartheta = -\Delta\psi$, с учетом этого и (13) из (11) получим:

$$H = -\frac{\partial \bar{m}_z}{\partial \alpha} + \frac{\partial \bar{m}_z}{\partial \psi} + \frac{\partial \bar{m}_z}{\partial h} \frac{\Delta h}{\Delta\psi}, \quad (14)$$

где $\bar{m}_z = m_z/G$.

В (14) величина $\Delta h/\Delta\psi$ является коэффициентом связанности двух типов движения: движения по вертикали и поворота относительно поперечной оси. Этот параметр является характерной особенностью экранопланов (также как и судов с динамическими принципами поддержания) по сравнению с классическими ЛА и водоизмещающими судами. Аналогом этой величины у водоизмещающих судов является изменение посадки при так называемых равнообъемных наклонениях (в математических моделях начальной остойчивости теорема Эйлера о равнообъемных ватерлиниях и следствие к ней имеет большое значение для анализа равнообъемных наклонений) [5]. Это принципиальное отличие начальной продольной остойчивости экраноплана от водоизмещающих судов.

Для определения коэффициента связанности $\Delta h/\Delta\psi$ используем второе уравнение в (12) и разложение (13):

$$\Delta \bar{Y} = -\frac{\partial \bar{Y}}{\partial \alpha} \Delta\alpha + \frac{\partial \bar{Y}}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial \bar{Y}}{\partial \psi} \Delta\psi = 0.$$

Отсюда

$$\frac{\Delta h}{\Delta\psi} = -\frac{\frac{\partial \bar{Y}}{\partial \alpha} + \frac{\partial \bar{Y}}{\partial \psi}}{\frac{\partial \bar{Y}}{\partial h}}. \quad (15)$$

Подставляя (15) в (14), получим

$$H = -(\bar{m}_z^\alpha - m_z^\psi) + \frac{\bar{m}_z^h}{\bar{Y}^h} (\bar{Y}^\alpha - \bar{Y}^\psi), \quad (14')$$

или учитывая, что $\theta = 0$ и $\Delta\alpha = \Delta\psi = \Delta\vartheta$, найдем:

$$H = 2\bar{Y}^\vartheta \left(\frac{\bar{m}_z^h}{\bar{Y}^h} - \frac{\bar{m}_z^\vartheta}{\bar{Y}^\vartheta} \right) = 2\bar{Y}^\vartheta (f^h - f^\vartheta) = -\frac{A_0}{\bar{Y}^h}. \quad (14'')$$

Выражения (14') или (14'') являются расчетными для определения начальной продольной условной метацентрической высоты экранопланов. Из (14''), в частности, следует, что условие достаточной продольной остойчивости экраноплана

$$H > 0$$

эквивалентно условию асимптотической устойчивости продольного движения (7)

$$A_0 > 0.$$

Практические формулы для расчетов условной метацентрической высоты зависят от формы представления информации о силах и моментах на элементах гидроаэродинамического комплекса. Если эти величины представить как суммы по элементам комплекса, то на основании (4), (13), (14) и (15) можно получить [1, 2]:

$$H = \sum_{k=1}^N A_k \left\{ y_k C_{y_k} - x_k C_{y_k}^\alpha - b_k C_{m_k}^\alpha + (x_k C_{y_k}^h + b_k C_{m_k}^h) \frac{\Delta h}{\Delta \psi} \right\},$$

$$\frac{\Delta h}{\Delta \psi} = - \frac{\sum_{k=1}^N (C_{y_k}^\alpha + x_k C_{y_k}^h)}{\sum_{k=1}^N A_k C_{y_k}^h}, \quad (16)$$

где $A_k = \frac{1}{2} \rho_k V^2 S_k / G$, S_k – характерная площадь k -го элемента; b_k – характерный линейный размер k -го элемента в формуле для момента; (x_k, y_k) – координаты точки на несущем элементе, определяющей его положение в пространстве при движении аппарата со скоростью V ; C_{y_k} , C_{m_k} – коэффициенты подъемной силы и момента несущего элемента.

Если имеются данные о продувке аппарата в аэродинамической трубе, то формулы (16) упрощаются:

$$\frac{\Delta h}{\Delta \psi} = - \frac{C_y^\alpha + x_{ц.д} C_y^h}{C_y^h},$$

$$H = \frac{Q}{G} b_{сax} \left[-C_m^\alpha + C_m^h \left(-x_{ц.д} + \frac{\Delta h}{\Delta \psi} \right) \right], \quad (17)$$

где $x_{ц.д}$ – координата точки приложения силы на основном крыле; $b_{сax}$ – средняя аэродинамическая хорда; $Q = \frac{1}{2} \rho V^2 S$.

В формулах (16) и (17) не учтены составляющие от сил сопротивления и тяги движителей, которые, как правило, имеют второй порядок малости. Дополнительные составляющие в (16) или (17) от поддувной части подъемной силы и момента определяются по методу, изложенному в [6] и [7].

В [6] предложена схема приближенного учета влияния турбулентной струи от движителей на подъемную силу крыла вблизи опорной поверхности. Как показали расчеты, выполненные для СДВП «Волга-2», и сопоставление их с натурным экспериментом, представленное в [7], главная часть в выражении для подъемной силы может быть определена из гидравлической задачи о поле скоростей и давлений в щели, образованной плоским экраном и несущей поверхностью, обдуваемой турбулентной струей от работающего движителя [6].

Влияние поддува на характеристики устойчивости продольного движения проявляется через сильную зависимость дополнительной поддувной подъемной силы $Y_{вп}$ от положения крыла с шайбами относительно экрана. На геометрию щели между крылом с шайбами и экраном, очевидно, влияют отстояние аппарата от экрана h и угол тангажа ϑ . От этих величин зависит как величина $S_{вх}$, так и величина $S_{вых}$ площадей щелей по периметру между экраном и крылом. Выражение для поддувной подъемной силы имеет вид [6]:

$$Y_{ен} = q_{ен} D_S, \quad (18)$$

где

$$q_{ен} = \frac{1}{2} \rho V_{вх}^2 S_{кр}$$

$$D_S = \left(1 - \frac{S_{вх}^2}{S_{вых}^2} \right) > 0. \quad (19)$$

Тогда производные $Y_{вп}$ по h и ϑ будут иметь вид:

$$Y_{ен}^{h,\vartheta} = q_{ен} D_S^{h,\vartheta}, \quad (20)$$

$$D_S^{h,\vartheta} = 2 \frac{S_{\text{вх}}^2}{S_{\text{вых}}^2} \left(\frac{S_{\text{вых}}^{h,\vartheta}}{S_{\text{вых}}} - \frac{S_{\text{вх}}^{h,\vartheta}}{S_{\text{вх}}} \right).$$

Для вычисления производных в (20) необходимы зависимости геометрии входных и выходных площадей от отстояния h и угла тангажа ϑ , которые могут быть определены по чертежам аппарата. Дополнительный момент от поддувной силы $M_{\text{звп}}$ можно определить, если известно положение центра давления $x_{\text{вп}}$. Тогда:

$$M_{\text{звп}} = (x_{\text{вп}} - x_{\text{ц.м.}}) Y_{\text{вп}}. \quad (21)$$

Так как положение центра давления слабо меняется в зависимости от h и ϑ [7], то производные дополнительного продольного момента можно приближенно определить так:

$$M_{\text{звп}}^{h,\vartheta} = (x_{\text{вп}} - x_{\text{ц.м.}}) Y_{\text{вп}}^{h,\vartheta}$$

или

$$m_{\text{звп}}^{h,\vartheta} = (x_{\text{вп}} - x_{\text{ц.м.}}) \bar{Y}_{\text{вп}}^{h,\vartheta}, \quad (22)$$

где

$$\bar{m}_{\text{звп}} = M_{\text{звп}}/G; \quad \bar{Y}_{\text{вп}} = Y_{\text{вп}}/G.$$

С учетом приведенного выше формулы (15) и (14) для коэффициента связанности перемещений и условной метацентрической высоты примут вид

$$\frac{\Delta h}{\Delta \psi} = - \frac{\bar{Y}^\alpha + \bar{Y}^\vartheta + \bar{Y}_{\text{вп}}^\vartheta}{\bar{Y}^h + \bar{Y}_{\text{вп}}^h},$$

$$H = -(\bar{m}_z^\alpha + \bar{m}_z^\vartheta + m_{\text{звп}}^\vartheta) \frac{\bar{m}_z^h + \bar{m}_{\text{звп}}^h}{\bar{Y}^h + \bar{Y}_{\text{вп}}^h} (\bar{Y}^\alpha + \bar{Y}^\vartheta + \bar{Y}_{\text{вп}}^\vartheta). \quad (23)$$

Формулы (23) являются расчетными для определения характеристик продольной остойчивости движения экранопланов с учетом поддува движителей под крыло.

2. Расчеты продольной остойчивости экраноплана «Орленок»

Исходные данные для расчета являются геометрия и результаты продувок экраноплана Орленок в аэродинамической трубе.

Схема расчета начальной остойчивости экраноплана «Орленок» такова:

- 1) независимые переменные расчета (в порядке включения циклов машинной программы) весовое водоизмещение $G = 100, 122, 140$, угол отклонения закрылка $\delta_z = 0^\circ, 20^\circ, 30^\circ$, угол тангажа $\vartheta = -1^\circ, \dots, +3^\circ$, скорость движения экраноплана $V = 250, \dots, 350$ км/час;
- 2) для каждой скорости при фиксированных других параметрах (и, как правило, при работе стартовых и маршевого СУ в режиме номинальной тяги) определяется положение экраноплана по высоте. При этом дополнительная подъемная сила и момент от поддува определяется по схеме, изложенной в [6] по формулам (18), (19);
- 3) по формулам (22), (23) определяются коэффициент связанности перемещений $\Delta h/\Delta \psi$ и условная метацентрическая высота H ;
- 4) вычисляется плечо продольной остойчивости по формуле

$$l_{\text{пр}} = H \cdot \vartheta. \quad (24)$$

Аэродинамические характеристики и их произвольные по h и ϑ определяются с использованием алгоритме бикубической сплайн-интерполяции по массивам результатов продувок.

Некоторые результаты расчета

Результаты расчета представлены на рис. 1-3. На рис. 1 приведен пример зависимости от угла тангажа (независимая переменная) для трех различных скоростей в пределах от взлетной скорости до крейсерской ($V = 270, 310, 350$ км/час) условной метацентрической высоты H (рис. 1, а) и плечо продольной остойчивости l (рис. 1, б). На этих графиках постоянными параметрами являются масса экраноплана и угол отклонения закрылков.

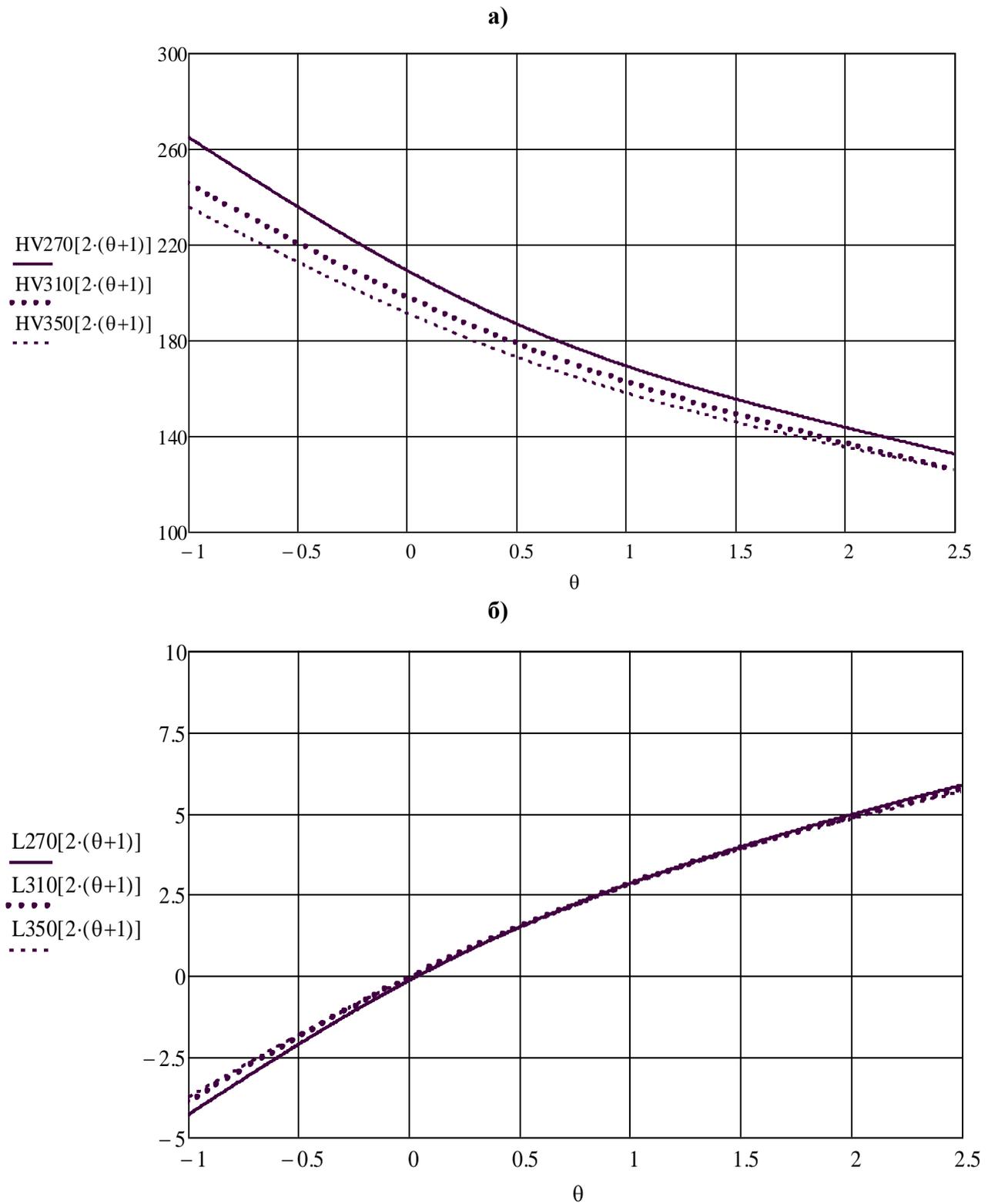


Рис. 1. Зависимости: а) условной метацентрической высоты H от угла тангажа (водоизмещение 122 т., отклонение закрылка $\delta_3=0^\circ$, скорость $V = 270, 310, 350$ км/час); б) плеча начальной остойчивости l от угла тангажа при тех же параметрах

На рис. 2 приведена зависимость условной метацентрической высоты H от веса экраноплана для трех значений угла отклонения закрылка $\delta_3 = 0^\circ, 20^\circ$ и 30° (скорость $V = 350$ км/час и угол тангажа $\vartheta = 0^\circ$ фиксированы).

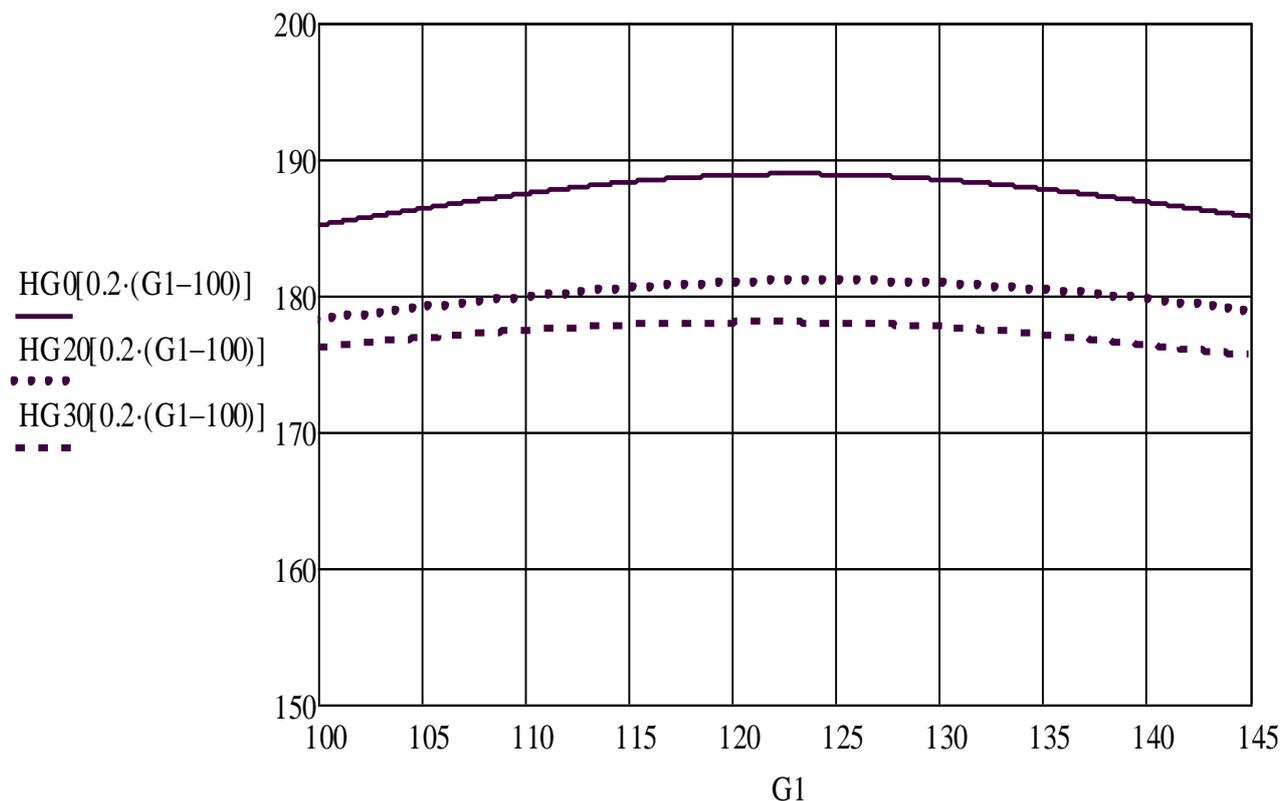
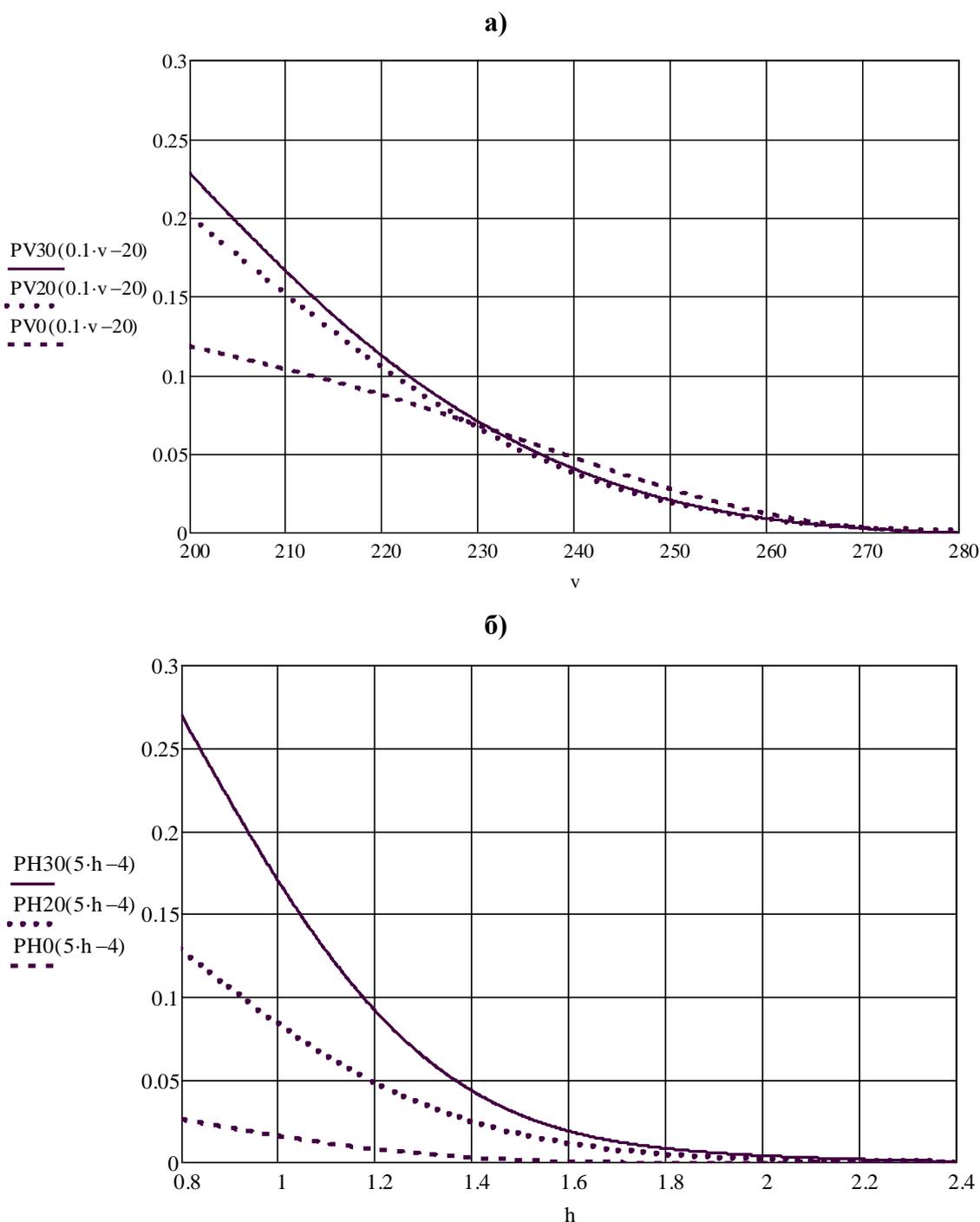


Рис. 2. Зависимость условной метацентрической высоты H от водоизмещения G для трех значений угла отклонения закрылка $\delta=0^\circ, 20^\circ, 30^\circ, G = 125 \text{ т}, \vartheta = 0^\circ$

Зависимость относительной доли поддувной подъемной силы $\bar{Y}_{\text{ВП}}$ от скорости движения и от высоты полета для трех значений угла отклонения закрылка δ_z ($G = 125 \text{ т}, \vartheta = 0^\circ$) приведена на рис. 3, а) и б) соответственно.

Анализ результатов расчета позволяет отметить следующее:

- условная метацентрическая высота имеет наибольшие значения на взлете и с ростом скорости уменьшается, стремясь к своему пределу, слабо зависящему от скорости, для аппарата в полете вдали от экрана;
- с ростом угла тангажа условная метацентрическая высота уменьшается;
- зависимость величины плеча продольной остойчивости от угла тангажа существенно нелинейна и несимметрична относительно $\vartheta = 0$: при отрицательных углах тангажа величина l_n по абсолютной величине больше, чем l_n при тех же положительных значениях ϑ ;
- величина условной продольной метацентрической высоты слабо зависит от величины загрузки экраноплана и уменьшается с ростом угла отклонения закрылка, что связано с увеличением при этом высоты полета;
- поддувная подъемная сила на предвзлетных режимах сильно зависит от угла отклонения закрылка, составляя существенную величину (порядка десятков процентов веса экраноплана) и быстро уменьшается при увеличении высоты полета (исчезает при зазоре под килем в плоскости хвостовика крыла в диапазоне $0,8 - 1,6 \text{ м}$ при $\delta_z = 0^\circ - 30^\circ$).



**Рис. 3. а) – поддувная подъемная сила в долях суммарной подъемной силы $\bar{Y}_{ВП}$ в зависимости от скорости v км/ч для трех значений угла отклонения закрылка $\delta=30, 20, 0^\circ$, $G = 125$ т, $\vartheta = 0^\circ$;
б) – то же в зависимости от высоты полета h /**

Подводя итог анализа продольной остойчивости (устойчивости продольного движения) экранопланов, можно отметить, что нормирование этого их мореходного качества по восстанавливающему моменту (по условной метацентрической высоте) имеет ясное физическое содержание и более чем трехсотлетнюю историю. Вероятно, в окончательном варианте «Норм...» произойдет объединение некоторых положений норм летной годности и правил классификации и постройки морских судов.

Библиографический список

1. **Орлов, Ю.Ф.** К вопросу о статической устойчивости тел, движущихся вблизи жидкой или твердой поверхности / Асимптотические методы в механике. – Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1979. С. 88-106.
2. **Орлов, Ю.Ф.** Потенциал ускорений в гидродинамике корабельных волн / Ю.Ф. Орлов. – Новосибирск: Наука, 1979. – 214 с.
3. **Остославский, И.В.** Продольная устойчивость и управляемость самолета / И.В. Остославский, Г.С. Калачев. – М.: Оборонгис, 1951. – 363 с.
4. **Иродон, Ф.Д.** Ученые записки ЦАГИ, Т. 1, 1970. С. 68-72.
5. **Алферьев, М.Я.** Теория корабля. – М.: Транспорт, 1972. – 448 с.
6. **Орлов, Ю.Ф.** Приближенный расчет подъемной силы крыла вблизи опорной поверхности в струе от движителей // Асимметрические методы в теории систем. Иркутск: ИНЦ СО АН СССР, 1994. С. 14-32.
7. **Антонов, А.А.** Особенности продольной остойчивости судна на динамической воздушной подушке «Волга-2» / А.А. Антонов, Ю.Ф. Орлов, В.В. Соколов / Асимптотические методы в теории систем. – Иркутск, ИНЦ СО АН СССР, 1990. С. 200-218.