

## Групповое применение беспилотных планирующих летательных аппаратов

© В.Т. Грумондз<sup>1</sup>, Е.И. Карпежников<sup>2</sup>, М.А. Полищук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Россия

<sup>2</sup>АО «ГНПП «Регион», Москва, 115230, Россия

*Статья посвящена решению актуальной задачи группового использования беспилотных планирующих летательных аппаратов с крыльевым модулем. Рассматриваемая задача имеет множество практических применений и расширяет возможности решения ранее сформулированных задач. Особенностью аппаратов такого типа является отсутствие силовой установки, что накладывает жесткие ограничения на запас имеющейся энергии. Предложен алгоритм группового полета. Одним из существенных элементов разрабатываемого алгоритма является процедура построения конечного множества опорных (навигационных) точек для каждого беспилотного планирующего летательного аппарата из группы. Учитываются ограничения на начальный запас энергии на левом конце траекторий и условия точности на правом конце. Описан способ формирования траекторий полета по навигационным точкам. Построен алгоритм обхода препятствия в задаче совместного полета. Приведены результаты моделирования, иллюстрирующие работу алгоритмов группового применения беспилотных планирующих летательных аппаратов конкретной аэродинамической схемы.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, планирующий летательный аппарат, аппарат с крыльевым модулем, алгоритм группового полета, начальный запас энергии, условия точности формирование траектории полета, аэродинамическая схема

**Введение.** Построение алгоритма совместного полета группы беспилотных планирующих летательных аппаратов с крыльевым модулем (БПК ЛА, аппарат) необходимо для решения широкого спектра практических задач [1, 2]. Одним из существенных элементов алгоритма является процедура построения конечного множества опорных (навигационных) точек для каждого БПК ЛА из группы. В этом смысле настоящая работа развивает подход, предложенный в работах [3–5].

В составе БПК ЛА отсутствует силовая установка, поэтому его движение совершается с помощью расхода имеющегося суммарного запаса энергии, полученной от носителя в момент старта, что значительно усложняет разработку алгоритма [5, 6].

В настоящей работе рассмотрены две задачи:

- разработка общего принципа построения траекторий полета каждого аппарата, совершающего полет в группе;

• разработка алгоритма обхода препятствия, находящегося на пути полета группы летательных аппаратов.

Все БПК ЛА стартуют с носителя, представляющего собой некоторый летательный аппарат, интерференционное влияние которого на движение на начальном участке полета не учитывается [7–9].

**Постановка задачи 1.** Пусть существует некоторое количество  $n$  БПК ЛА  $B_1, B_2, \dots, B_n, i = 1, \dots, n$ , каждый из которых начинает движение в своей начальной точке  $s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n$  в моменты времени  $t_i = t_1 + (i - 1)\Delta t, i = 1, \dots, n$ . Беспилотные летательные аппараты движутся в течение времени  $T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n$  каждый по своей траектории  $L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_n$ , но все они имеют единую аэродинамическую схему [7]. Начальные условия полета одинаковы для всех БПК ЛА:  $V_0 = V_1 = \dots = V_n, H_0 = H_1 = \dots = H_n$ , где  $V_0, H_0$  — скорость и высота полета в точке начала движения каждого аппарата равны скорости и высоте полета носителя.

Для каждого  $i$ -го БПК ЛА заданной аэродинамической схемы требуется сформировать траекторию  $L_i$  так, чтобы достижение точки интереса (ТИ) всеми аппаратами произошло в единый момент времени  $T = t_1 + T_1 = t_2 + T_2 = \dots + t_n + T_n$ . Промах  $\varepsilon$  не должен превышать заданного значения  $\varepsilon^*$ ,  $\varepsilon \leq \varepsilon^*$ , разница  $\Delta$  во времени достижения ТИ всеми БПК ЛА не должна превышать заданного значения  $\Delta^*$ ,  $\Delta \leq \Delta^*$ . На всем протяжении полета потери суммарной энергии при совершении маневров для выдерживания заданной траектории каждого БПК ЛА должны быть минимальны.

**Алгоритм решения.** Рассмотрим некоторую прямолинейную траекторию планирования  $L_6$ , берущую начало в точке  $s = s_6$  и заканчивающуюся в ТИ. Для нее выполняется условие  $L_{\text{пр}} \leq K_{\text{max}} H_0$ , где  $L_{\text{пр}}$  — проекция  $L_6$  на горизонтальную плоскость,  $K_{\text{max}}$  — максимальное аэродинамическое качество БПК ЛА. Примем траекторию  $L_6$  за базовую.

Предположим, что носитель движется на постоянной высоте с постоянной скоростью. Угол между проекцией на горизонтальную плоскость базовой траектории и проекцией на горизонтальную плоскость траектории полета носителя обозначим через  $\tau$ ,  $\tau \in [0, 90^\circ]$  (рис. 1). Индекс  $g$  используется для обозначения нормальной земной системы координат.

Рассматриваемая задача имеет практический смысл, когда ТИ находится в передней полусфере носителя. Это обусловлено безопасностью отделения БПК ЛА от носителя.

Формирование траекторий осуществляется с помощью выбора опорных (навигационных) точек  $N_{ij}(X_{ij}, Z_{ij}), i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n$ . Предположим, что с носителя, движущегося в направлении ТИ,

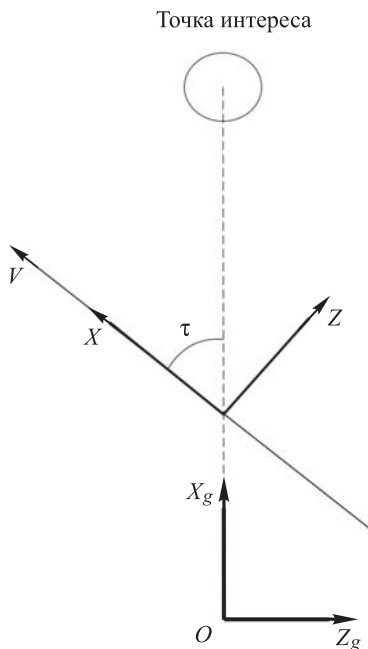


Рис. 1. Возможные направления полета носителя

стартует некоторое количество летательных аппаратов. Для решения задачи примем интервалы между сбросами БПК ЛА фиксированными и равными  $\Delta t = \text{const}$ ; в дальнейшем по результатам решения задачи будет возможно сформировать траекторию полета любого БПК ЛА, начинающего движение в любой момент времени в пределах области применения алгоритма, о которой будет сказано ниже. Для решения поставленной задачи будем формировать траекторию полета каждого  $i$ -го аппарата с помощью одной навигационной точки (НТ)  $N_{ij}(X_{ij}, Z_{ij})$ .

Выбор каждой НТ осуществляется следующим образом.

1. Рассчитывается значение координаты навигационной точки по оси  $OX_g$  как половина длины проекции базовой траектории полета (рис. 2):

$$X_{gi1} = \frac{1}{2}(L_{\sigma} - L_{\sigma i}^*), \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где  $L_{\sigma i}^*$  — проекция на горизонтальную плоскость участка базовой траектории, пройденного носителем от точки  $s_{\sigma}(t_{\sigma})$  до точки сброса очередного изделия  $s_i(t_i)$ :

$$L_{\sigma i}^* = V_0 t_{i+1} \cos \tau, \quad i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Выбор координаты навигационной точки по оси  $OX_g$  с помощью формулы (1) не является единственно возможным вариантом, он

принят с целью обобщения алгоритма и решения задачи для любого  $\tau$ ,  $\tau \in [0, 90^\circ]$ . Расчеты показывают, что когда  $\tau = 0$  и траектория построена по навигационной точке с координатой, полученной по формуле (1), БПК ЛА будет выполнять наиболее пологий вираж (полет с наименьшим креном), что позволит минимизировать потери энергии при совершении маневра.

2. Путем подбора выбирается значение координаты НТ по оси  $OZ_g$  с помощью математического моделирования динамики движения БПК ЛА. Перебирают значения координаты  $Z_g$  с шагом  $\Delta Z_g = 50$  м до тех пор, пока не выполняются условия  $\epsilon \leq \epsilon^*$ ,  $\Delta \leq \Delta^*$ .

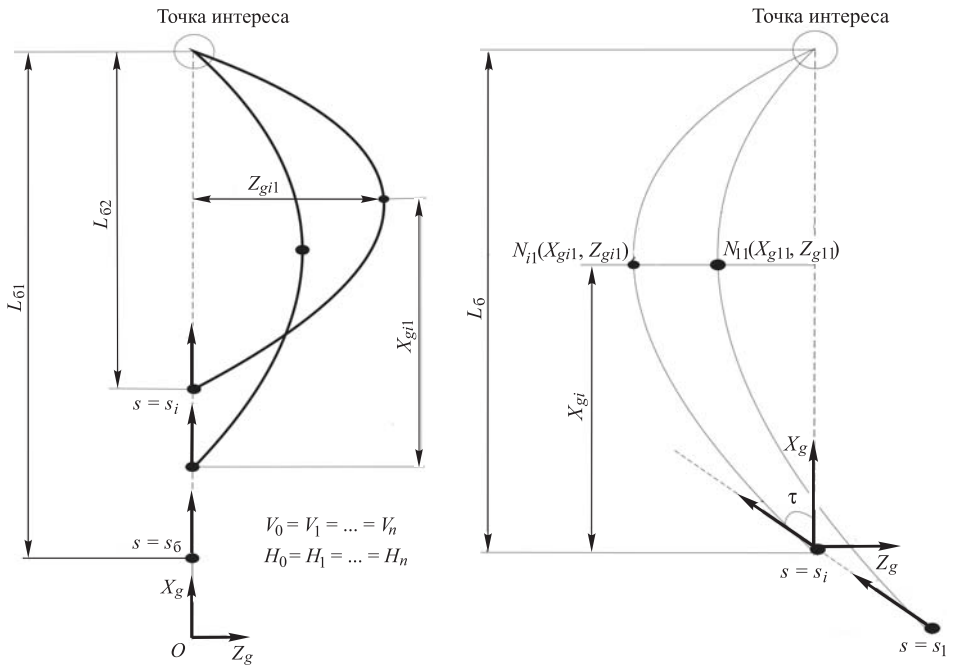


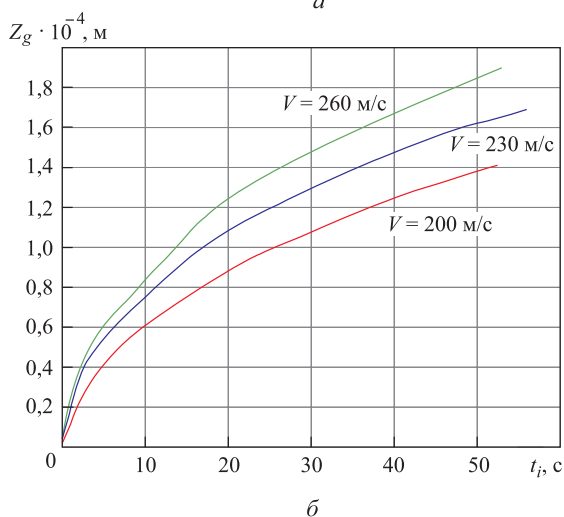
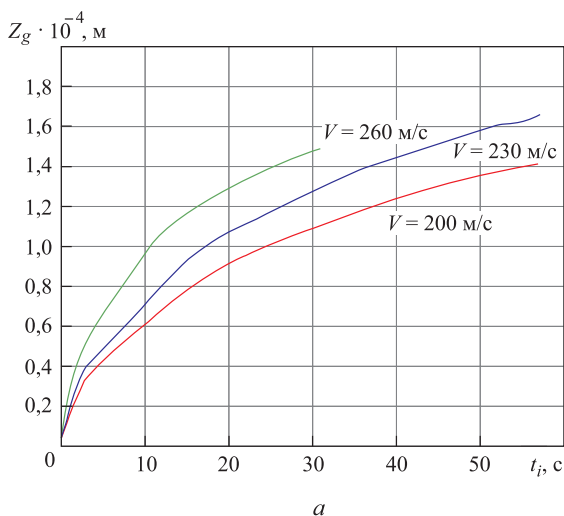
Рис. 2. К построению алгоритма согласованного полета группы БПК ЛА

В результате реализации представленного алгоритма получаем набор навигационных точек  $N_{i1}(X_{gi1}, Z_{gi1})$ , каждой из которых будет соответствовать своя траектория  $L_i$ . Так же можно сформировать область, в которой будет существовать решение задачи совместного полета. Протяженность этой области равна  $L_{6n}^*$ . Ширина зависит от угла  $\tau$  и (или) динамических возможностей конкретного БПК ЛА, например, при  $\tau = 0$  область — это некоторый отрезок, в каждой точке которого существует решение задачи совместного полета.

**Некоторые результаты моделирования.** Для решения задачи и демонстрации работы алгоритма проведено математическое модели-

рование на примере модели динамики движения БПК ЛА, выполненного по нормальной аэродинамической схеме с Х-образным хвостовым оперением. На оперении установлены рулевые поверхности, на крыле — элероны. По результатам моделирования формируются таблицы значений координат навигационных точек  $N_{i1}(X_{gi1}, Z_{gi1})$  для заданных высотно-скоростных режимов  $(H, V)$ .

Выполнив аппроксимацию [10] по найденным координатам  $Z_{gi}$ , определим функциональные зависимости  $Z_g = f(t_i, V_0, H_0, \Delta, \varepsilon)$ , с помощью которых можно получить координаты навигационных точек для любого БПК ЛА заданной аэродинамической схемы, стартующего в любой момент времени  $t \in [t_1, t_n]$  (рис. 3). По этим функциональным зависимостям можно вычислить координаты НТ для любого  $i$ -го БПК ЛА.



**Рис. 3.** Зависимость расположения навигационных точек от времени сброса:  
 а —  $H_0 = 10$  км,  $L_0 = 75$  км; б —  $H_0 = 12$  км,  $L_0 = 90$  км

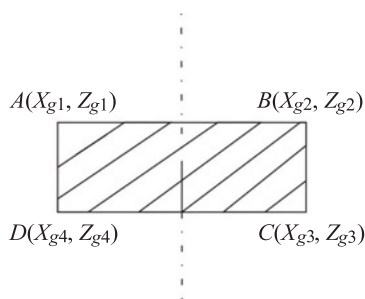
Разработанный алгоритм справедлив для ограничений, установленных в постановке задачи 1. На практике возникает множество дополнительных факторов, влияющих на работу алгоритма, например, особенности рельефа земной поверхности – естественные (складки местности, горы) и искусственные (здания, инженерные сооружения) преграды. В этих случаях для достижения группой точки интереса необходимо построить траектории с учетом расположения препятствия на пути полета группы.

**Постановка задачи 2.** Предположим, что точка интереса скрыта за препятствием. Координаты препятствия и ТИ известны. Необходимо разработать алгоритм облета препятствия и одновременного сбора в ТИ всех БПК ЛА, стартующих с носителя.

Требуется для каждого  $i$ -го аппарата выбрать траекторию полета, удовлетворяющую условиям Задачи 1 и дополнительным условиям, связанным с наличием препятствия.

**Алгоритм решения.** Рассмотрим случай  $\tau = 0$ , препятствие представим как бесконечный по высоте прямоугольный параллелепипед. Такая форма позволит учесть большинство возможных препятствий как искусственных, так и естественных.

Проекцией препятствия на горизонтальную плоскость является прямоугольник некоторой площади. Обозначим вершины этого прямоугольника как точки с координатами  $A(X_{g1}, Z_{g1})$ ,  $B(X_{g2}, Z_{g2})$ ,  $C(X_{g3}, Z_{g3})$ ,  $D(X_{g4}, Z_{g4})$  (рис. 4).

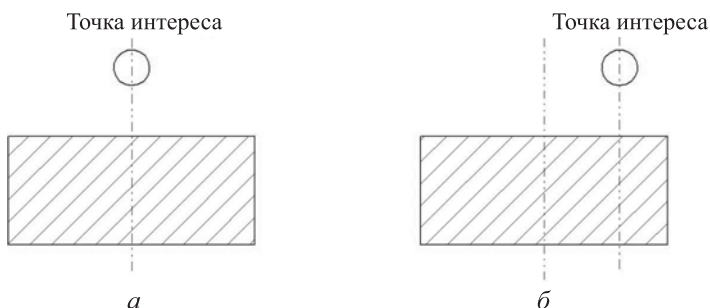


**Рис. 4.** Проекция препятствия на горизонтальную плоскость

Поскольку препятствие выбрано бесконечным по высоте прямоугольным параллелепипедом, возможно совершать его облет только слева или справа. В зависимости от взаимного расположения препятствия и ТИ можно выделить два варианта облета (рис. 5):

- ТИ находится на оси симметрии проекции назначенного параллелепипеда на горизонтальную плоскость; облетать препятствие можно с любой стороны или с двух сторон одновременно;

• ТИ смещена относительно оси симметрии проекции назначенного параллелепипеда; облетать препятствие необходимо со стороны, находящейся ближе к ТИ.



**Рис. 5.** Возможные варианты облета препятствия:  
*a* — ТИ находится на оси симметрии назначенного прямоугольника;  
*б* — ТИ смещена относительно оси симметрии назначенного прямоугольника

Построение траекторий полета, как и в Задаче 1, осуществляется с помощью назначения навигационных точек с той лишь разницей, что для облета препятствия необходимо строить траектории с использованием как минимум двух навигационных точек  $N_{i1}(X_{gi1}, Z_{gi1})$  и  $N_{i2}(X_{gi2}, Z_{gi2})$ ,  $i = 1, \dots, n$  для каждой  $i$ -й траектории каждого  $i$ -го БПК ЛА.

Пусть носитель движется в направлении ТИ по некоторой прямой траектории с углом  $\tau = 0$ . В отличие от Задачи 1 базовая траектория  $L_6$  — виртуальная, т. е. аппарат не может совершать полет по этой траектории, и она является вспомогательной, относительно которой будут строиться другие  $i$ -е траектории.

Выбор каждой НТ осуществляется следующим образом.

1. Для каждой траектории зафиксируем значение координат навигационной точки по оси  $OX_g$ . Они будут равны координатам  $X_g$  вершин заданного прямоугольника (рис. 6).

2. Координаты  $Z_g$  для обеих навигационных точек каждой  $i$ -й траектории будут равны. Как и в задаче 1 выбор значения координаты  $Z_g$  осуществляется путем ее перебора с шагом  $\Delta Z_g = 50$  м.

**Некоторые результаты моделирования.** Проводя аппроксимацию по найденным координатам  $Z_g$ , получаем функциональные зависимости  $Z_g = f(t_i, V_0, H_0, \Delta, \varepsilon)$ , с помощью которых можно рассчитать координаты навигационных точек для любого БПК ЛА заданной аэродинамической схемы, стартующего в любой момент времени  $t \in [t_1, t_n]$  (рис. 7).

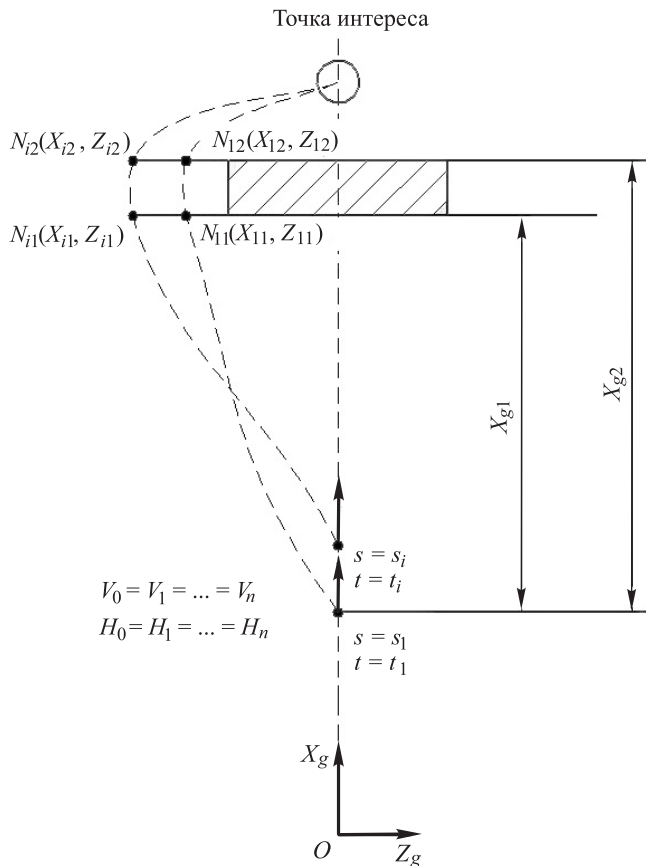


Рис. 6. Облет препятствия (в задаче совместного полета)

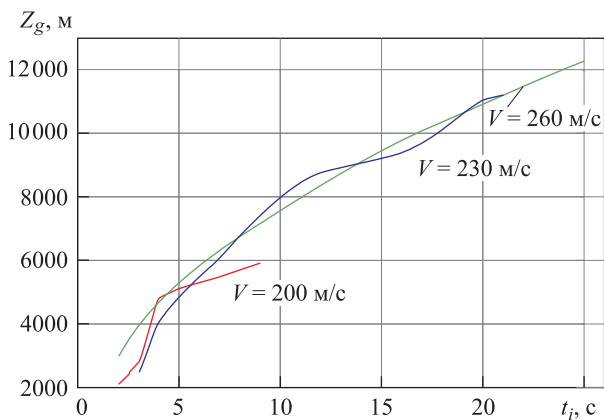


Рис. 7. Зависимость координат навигационных точек от времени сброса БПК ЛА в задаче совместного полета и облета препятствия:  
 $H_0 = 10$  км;  $L_0 = 75$  км



**Заключение.** В работе реализован алгоритм группового полета нескольких БПК ЛА. Результаты реализации алгоритма показывают, что при удалении навигационной точки по оси  $OZ_g$  от базовой траектории в направлении, нормальном к ней, увеличивается потребный радиус виража, а при достижении некоторой координаты  $Z_{gi1}$  перестает выполняться критерий точности достижимости ТИ. Из этого следует, что размеры области, в которой существует решение задачи совместного полета, зависят от высоты сброса, погрешностей  $\Delta$  и  $\varepsilon$ , скорости сброса, дальности до ТИ, маневренности БПК ЛА и его аэродинамического облика. Длина траектории, сформированной назначением опорных (навигационных) точек, не должна превышать максимально допустимую дальность планирующего полета рассматриваемого аппарата, навигационные точки должны быть динамически достижимы для БПК ЛА данного типа.

На основе алгоритма группового полета реализован алгоритм облета препятствия группой БПК ЛА. Размеры области, в которой существует решение задачи облета препятствия группой, зависят от тех же параметров, что и в задаче совместного полета и от размера препятствия и его расположения относительно ТИ и БПК ЛА в момент старта.

Алгоритмы справедливы для любых аэродинамических схем БПК ЛА. Гибкость полученных алгоритмов позволяет решать большой спектр задач динамики и наведения беспилотных летательных аппаратов, а также задачи выбора их параметров, удовлетворяющих условиям, заданным в постановке задачи.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Остославский И.В., Стражева И.В. *Динамика полета. Траектории летательных аппаратов*. Москва, Оборонгиз, 1963.
- [2] Семенов С.С., Харчев В.Н. *Проблемы создания корректируемых и управляемых авиационных бомб*. Е.С. Шахиджанов, ред. Москва, НИЦ «Инженер», 2003, с. 151–183.
- [3] Грумондз В.Т., Полищук М.А. Алгоритм формирования множества начальных состояний беспилотного планирующего ЛА в задаче о достижимости заданного набора навигационных точек. *Вестник Московского авиационного института*, 2013, т. 20, № 3, с. 154–159.
- [4] Грумондз В.Т., Полищук М.А., Черторыжская С.С. Синтез системы управления малого беспилотного планирующего летательного аппарата с крылом большого удлинения. *Авиационная техника. Известия высших учебных заведений*, 2012, № 3, с. 22–27.
- [5] Соловей Э.Я., Храпов А.В. *Динамика систем наведения управляемых авиабомб*. Москва, Машиностроение, 2006.
- [6] Бюшгенс Г.С., ред. *Динамика полета*. Москва, Машиностроение, 2011.
- [7] Грумондз В.Т., Полищук М.А., Черторыжская С.С. Выбор параметров аэродинамического и динамического облика беспилотного планирующего

летательного аппарата. *Вестник Московского авиационного института*, 2012, т. 19, № 4, с. 5–12.

- [8] Бочкарев А.Ф. *Аэромеханика самолета. Динамика полета*. Москва, Машиностроение, 1985.
- [9] Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. *Динамика полета беспилотных летательных аппаратов*. Москва, Оборонгиз, 1963.
- [10] Хемминг Р.В. *Численные методы*. Москва, Наука, 1968.

Статья поступила в редакцию 03.04.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Грумондз В.Т., Карпежников Е.И., Полищук М.А. Групповое применение беспилотных планирующих летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-11-1702>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на ХLI Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 января 2017 г.*

**Грумондз Валерий Тихонович** — д-р физ.-мат. наук, профессор, Московский авиационный институт. Область научных интересов: баллистика, динамика и управление летательными аппаратами. e-mail: V.Grumondz@gmail.com

**Карпежников Евгений Иванович** окончил Московский авиационный институт в 2016 г. Инженер, АО «ГНПП «Регион». Область научных интересов: баллистика, динамика и управление летательными аппаратами. e-mail: karpezhnikov@rambler.ru

**Полищук Максим Алексеевич** — канд. техн. наук, заместитель начальника отдела Аэродинамики, АО «ГНПП «Регион». Область научных интересов: баллистика, динамика и управление летательными аппаратами. e-mail: maxipol@mail.ru

## Unmanned gliding aircraft formation flying

© V.T. Grumondz<sup>1</sup>, E.I. Karpezhnikov<sup>2</sup>, M.A. Polischuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia

<sup>2</sup> JSC Scientific and Production Enterprise Region, Moscow, 115230, Russia

*The article is concerned with working out the crucial task of the formation flying of the unmanned gliding aircraft with the wing-mounted module. The problem considered has a lot of practical applications and increases the opportunities of the previously set out priorities. The distinctive feature of this type of aircraft is the lack of the power-unit, which imposes severe restrictions on the available energy reserves. We suggest an algorithm for flying in formation. The essential element of the algorithm developed is the procedure of setting up the ensemble of supporting navigational guide-points for each unmanned gliding aircraft in the group. The restrictions on the initial energy reserve on the left end of the trajectories as well as the accuracy requirements on the right end are taken into account. The article describes the method of path generation using the navigational guide-points and forms an algorithm for terrain avoidance during the formation flying. We look at the simulation results demonstrating the use of the algorithms for the formation of unmanned gliding aircraft flying of a particular aerodynamic configuration.*

**Keywords:** *unmanned aircraft, gliding aircraft, aircraft with the wing-mounted module, algorithm for flying in formation, initial energy reserve, accuracy requirements, path generation, aerodynamic configuration*

### REFERENCES

- [1] Ostoslavsky I.V., Strazheva I.V. *Dinamika poleta. Trayektorii letatel'nykh apparatov* [Flight dynamics. Trajectories of aircraft]. Moscow, Oborongiz Publ., 1963.
- [2] Semenov S.S., Kharchev V.N. *Problemy sozdaniya korrektruyemykh i upravlyaemykh aviatsionnykh bomb* [The problems of designing guided smart aircraft bombs]. E.S. Shakhidzhanov, ed. Moscow, NITs "Inzhener" Publ., 2003, pp. 151–183.
- [3] Grumondz V.T., Polischuk M.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta — Bulletin of Moscow Aviation Institute*, 2013, vol. 20, no. 3, pp. 154–159.
- [4] Grumondz V.T., Polischuk M.A., Chertoryzhskaya S.S. *Aviatsionnaya tekhnika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy — Russian Aeronautics*, 2012, no. 3, pp. 22–27.
- [5] Solovey E.Ya., Khrapov A.V. *Dinamika sistem navedeniya upravlyayemykh aviabomb* [Dynamics guided bombs' homing systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006, 328 p.
- [6] Biushgens G.S., ed. *Dinamika poleta* [Flight dynamics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011.
- [7] Grumondz V.T., Polischuk M.A., Chertoryzhskaya S.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta — Bulletin of Moscow Aviation Institute*, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 5–12.
- [8] Bochkariov A.F. *Aeromekhanika samoleta. Dinamika poleta* [Aeromechanics of the aircraft. Flight dynamics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985.
- [9] Lebedev A.A., Chernobrovkin L.S. *Dinamika poleta bespilotnykh letatel'nykh apparatov* [Dynamics of flight of unmanned aerial vehicles]. Moscow, Oborongiz Publ., 1963.

- [10] Hamming R.W. *Numerical Methods for Scientists and Engineers*. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1962 [In. Russ.: Hamming R.W. Chislennyye metody. Moscow, Nauka Publ., 1968].

**Grumondz V.T.**, Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Moscow Aviation Institute. Research interests include: ballistics, dynamics and aircraft control. e-mail: V.Grumondz@gmail.com

**Karpezhnikov E.I.** graduated from Moscow Aviation Institute in 2016. Engineer, Scientific and Production Enterprise Region, JSC. Research interests include: ballistics, dynamics and aircraft control. e-mail: karpezhnikov@rambler.ru

**Polishchuk M.A.**, Cand. Sc. (Eng.), assistant chief of the section “Aerodynamics”, Scientific and Production Enterprise Region, JSC. Research interests include: ballistics, dynamics and aircraft control. e-mail: maxipol@mail.ru