УДК: 629.7.025.3: 621.454.3
DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-1-67-76

ВЫБОР КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА И ВНЕШНЕЙ ГЕОМЕТРИИ ГАЗОВОГО РУЛЯ СИСТЕМЫ СКЛОНЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А.В. ВИНДЕКЕР[1,2], С.Г. ПАРАФЕСЬ[2]

[1]Долгопрудненское научно-производственное предприятие, г. Долгопрудный, Россия
[2]Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

Рассмотрены проблемы выбора материала и внешней геометрии газовых рулей системы склонения беспилотного летательного аппарата. При выборе материала основным критерием является количество уносимого материала с поверхности газового руля в единицу времени. Следует выбрать материал таким образом, чтобы при воздействии газовой струи на руль он не выгорал сразу, а обеспечивал свою работоспособность в течение всего времени, отведенного на его работу. Основные потери материала происходят на передней кромке газового руля. С целью уменьшения этого вредного эффекта выбирают термоэрозионностойкий материал (графит, молибден и др.).

На выбор геометрических параметров газового руля влияют характеристики газового потока, обтекающего руль. Получение при этом достоверных результатов затрудняется неравномерностью газового потока из сопла, наличием в нем несгоревших частиц топлива, затупленным профилем руля, влиянием на его обтекание боковых кромок и интерференции со стенками сопла. Конфигурация руля выбирается таким образом, чтобы обеспечить требуемое значение управляющей силы в конце работы руля с учетом ожидаемого выгорания передней кромки. Окончательное же решение по выбору параметров газового руля принимается на основе анализа большого количества модельных и натурных испытаний рулей-аналогов.

Предложена методика выбора конструкционного материала и внешней геометрии газового руля системы склонения беспилотного летательного аппарата. Методика базируется на соотношениях, полученных на основании обработки экспериментальных данных воздействия газовых струй на рули, выполненные из разных конструкционных материалов. Приведен пример решения задачи выбора конструкционного материала и внешней геометрии газового руля.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, система склонения, газовый руль, термоэрозионностойкий материал, внешняя геометрия.

ВВЕДЕНИЕ

При управлении современными высокоманевренными беспилотными летательными аппаратами (БЛА) возникает потребность создания управляющих сил с использованием газодинамических органов управления, так как на определенных участках траектории БЛА и его режимах работы аэродинамические органы управления оказываются недостаточно эффективными. Это в полной мере относится и к участку склонения вертикально стартующего БЛА. Процесс склонения современных БЛА характеризуется сравнительно малым временем, составляющим несколько секунд, поэтому для реализации этого процесса требуется создание относительно больших управляющих моментов за короткий промежуток времени [1, 2].

Эффективным способом создания управляющих сил и моментов является отклонение вектора тяги реактивного двигателя газовыми рулями. Это объясняется относительной простотой конструкции блока газовых рулей, возможностью дифференциального управления по всем трем каналам: тангаж, рысканье и крен, а также малыми потерями тяги в сравнении с иными газодинамическими органами управления.

Вопросы исследования и проектирования систем газодинамического управления, в том числе и с использованием газовых рулей, нашли отражение в работах [3–10]. Несмотря на достигнутый уровень исследований в данной области, актуальной остается разработка подходов к

решению задач выбора конструкционного материала и внешней геометрии газового руля систем склонения БЛА.

МЕТОДЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Газовый руль представляет собой консоль несущей поверхности, устанавливаемую обычно непосредственно за выходным сечением сопла реактивного двигателя. Такая консоль имеет небольшое удлинение и симметричный профиль.

В двигательных установках с односопловым блоком обычно применяется четырехлопастная схема расположения газовых рулей (рис. 1, *а*), позволяющая управлять полетом по тангажу (рули 2 и 4), рысканию (рули 1 и 3) и крену (дифференциальное отклонение рулей 2 и 4 или 1 и 3).

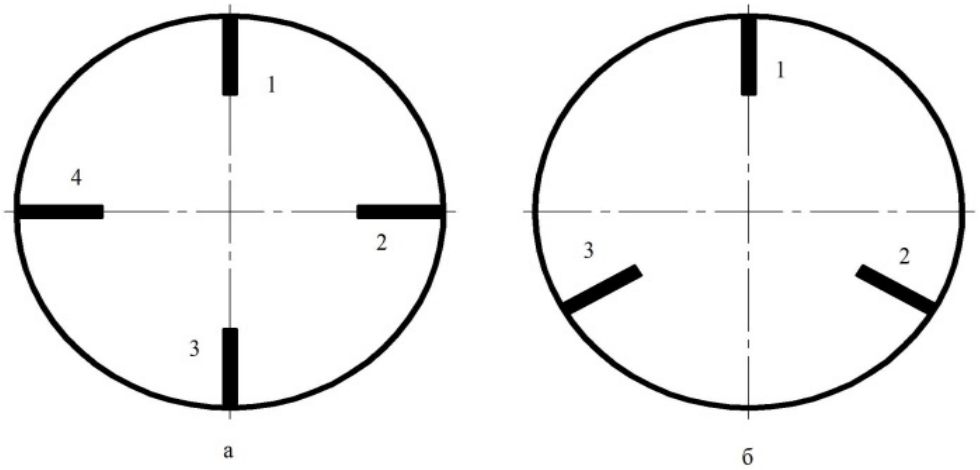

Рис. 1. Схемы расположения газовых рулей: *а* – четырехлопастная; *б* – трехлопастная
Fig. 1. Diagrams of gas rudders accommodation: *a* – four-blade; *b* – three-blade

Возможна также трехлопастная схема (рис. 1, *б*). Исследования показывают, что в такой схеме эффективность рулей повышается, так как каждый из них участвует в управлении по всем трем каналам. Одновременно уменьшается число рулевых машинок и усилителей, упрощается стыковка БЛА со стартовым агрегатом. Все это заметно снижает массу системы управления. Следует, однако, учитывать, что надежность работы такой системы из-за некоторого ее усложнения ниже, чем при четырехлопастной схеме.

Как показывают исследования, вовсе не обязательно размещать газовые рули непосредственно за выходным сечением. Их расположение возможно также и внутри сопла, что позволит при заданном управляющем усилии уменьшить площадь руля, так как скоростной напор газа, определяющий величину этого усилия, оказывается больше. Следует также иметь в виду, что если руль расположен на достаточном удалении от среза сопла, то могут возникать отрицательные эффекты, уменьшающие суммарное управляющее усилие за счет интерференции руля с внутренними стенками. При этом в связи с увеличением температуры газа усилится выгорание материала рулевого устройства. Возможность установки газовых рулей, как в газовом потоке, так и вне его на срезе сопла двигателя, обуславливает наличие альтернативных вариантов конструктивного исполнения блока газовых рулей.

При проектировании газовых рулей следует учитывать возможность их применения в комбинации с аэродинамическими органами управления (поворотным оперением). В этом случае газовые и аэродинамические рули имеют одну ось вращения. При использовании такой комбинации органов управления на первых ступенях БЛА газовые рули обеспечивают требуемую траекторию на ее начальном участке, где аэродинамическое управление является неэффективным вследствие малой скорости полета. По мере ее увеличения все большей составляющей

суммарного управляющего усилия становится усилие, создаваемое аэродинамическими рулями. При значительном разгоне БЛА надобность в газовых рулях отпадает, и они могут быть удалены из струи, чтобы не снижать тягу двигателя. Существенное преимущество комбинации аэродинамических и газовых рулей связано с возможностью использования одного и того же рулевого привода, что позволяет уменьшить массу системы управления.

Конструктивно газовый руль представляет собой профилированную консоль, закрепленную на оси (рис. 2).

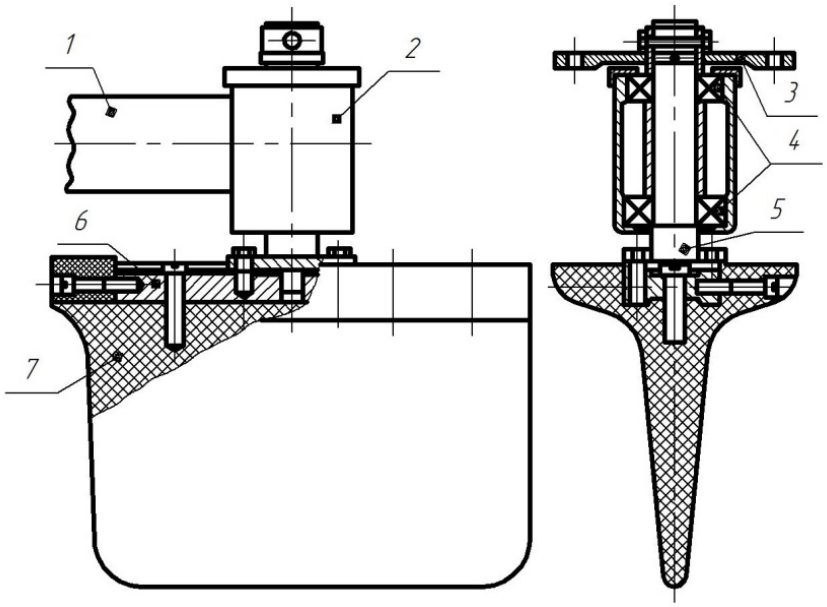

Рис. 2. Конструктивная схема газового руля: *1* – кронштейн; *2* – корпус подшипника; *3* – фланец; *4* – подшипник; *5* – ось руля; *6* – основание руля; *7* – перо руля
Fig. 2. The Structural diagram of gas rudder: *1* – bracket; *2* – bearing housing; *3* – flange; *4* – bearing; *5* – a rudder axle; *6* – a rudder basis; *7* – a rudder blade

Расчет сил, создаваемых газовым рулем, соответствующий выбор его формы, размеров и месторасположения являются весьма сложной задачей. Получение при этом достоверных результатов затрудняется неравномерностью газового потока из сопла, наличием в нем несгоревших частиц топлива, затупленным профилем руля, влиянием на его обтекание боковых кромок и интерференции со стенками сопла.

Конфигурация руля выбирается таким образом, чтобы обеспечить требуемое значение управляющей силы, необходимой для разворота БЛА, $P_{уп}$ в конце работы руля с учетом ожидаемого выгорания передней кромки.

Газовые рули – предмет особой заботы конструкторов летательных аппаратов. Окончательное решение по выбору параметров проектируемого газового руля принимается на основе анализа большого количества модельных и натурных испытаний рулей-аналогов. Во многих случаях экспериментальные исследования выявляют опасные взаимодействия «руль – сопло», связанные с интерференцией ударных волн, отрывом пограничного слоя, образованием вихрей и т.п. Эти зоны взаимодействия характеризуются резким увеличением давления и тепловых потоков. Локальные значения тепловых потоков, в частности, могут в 5–10 раз превышать интегральные значения.

Зоны взаимодействия «руль – сопло» образуются либо перед носком рулей (в случае не уносимых передних кромок из тугоплавких материалов), либо перед осью рулей (в случае интенсивно уносимых передних кромок). При длительной работе рулей опасной зоной может оказаться зазор между рулем и соплом. Несмотря на относительно малые размеры зон взаимодействия, они представляют серьезную опасность, так как могут привести к нарушению работоспо-

собности конструкции. Особенно опасны режимы работы рулей с углами отклонения, близкими к нулевым.

С целью существенного ослабления или полного устранения подобных эффектов, как указано выше, газовые рули выносятся из сопла и устанавливаются на специальных пилонах либо применяются специальные меры защиты. В числе таких мер: установка защитного «редана» (уступа) перед носком руля из теплозащитного материала, заглубление нижней части руля в теплозащитный материал раструба сопла, установка руля на специальной поворотной шайбе с минимальным зазором (для длительно работающих рулей) и др.

Основные задачи при проектировании газового руля состоят в выборе:

– геометрических параметров проектируемого органа управления, обеспечивающего максимальный уровень боковых усилий при минимальной величине потерь тяги в течение всего времени работы двигателя;

– материала, обладающего высокой прочностью и минимальными скоростями эрозионного разрушения, обеспечивающего стабильность величины управляющего усилия во времени;

– оптимального места расположения органов управления, исходя из оценки их влияния на конструктивные элементы соплового блока.

Остановимся далее на первых двух задачах проектирования газового руля [11, 12].

Для вычисления требуемой площади газового руля сначала находится минимальная площадь, при которой будет обеспечиваться необходимая сила для склонения БЛА:

$$S_{min} = \frac{P_{уп}}{0{,}5P_{уп}^{\delta}\delta\rho_a W_a^2},$$

где $P_{уп}^{\delta}$ – производная коэффициента управляющей силы в газовом потоке (подъемной силы по аналогии с воздушным потоком); δ – угол отклонения газового руля; ρ_a – плотность газового потока; W_a – скорость газового потока.

Плотность газового потока может быть определена через массовый секундный расход топлива, равный отношению массы топлива $m_т$ к времени работы двигателя $\tau_{дв}$, скорость газового потока W_a и площадь среза сопла $S_{ср}$ по формуле

$$\rho_a = \frac{m_т/\tau_{дв}}{W_a S_{ср}}.$$

Управляющий момент, создаваемый при отклонении газового руля на угол δ, будет

$$M_{уп} = P_{уп}L_{уп},$$

где $L_{уп}$ – расстояние от центра масс БЛА до оси вращения блока газовых рулей.

При выборе материала газового руля воспользуемся соотношениями, полученными на основании обработки экспериментальных данных воздействия газовых струй на рули, выполненных из разных конструкционных материалов [2]. Результаты экспериментальных исследований в виде графиков представлены на рис. 3, где $\overline{S}$ – относительная площадь руля, унесенная с передней кромки газового руля, выраженная в процентах; $S_{г.р}^{нач}$, $S_{г.р}^{кон}$ – начальная и конечная площади газового руля, соответственно, до и после воздействия газовой струи на руль.

Определяющим параметром, комплексно характеризующим газовый поток в зоне руля, является критериальный показатель $k_{эр}$, значение которого определяет эрозионное воздействие потока на материал передней кромки газового руля, на расчетном режиме работы двигателя.

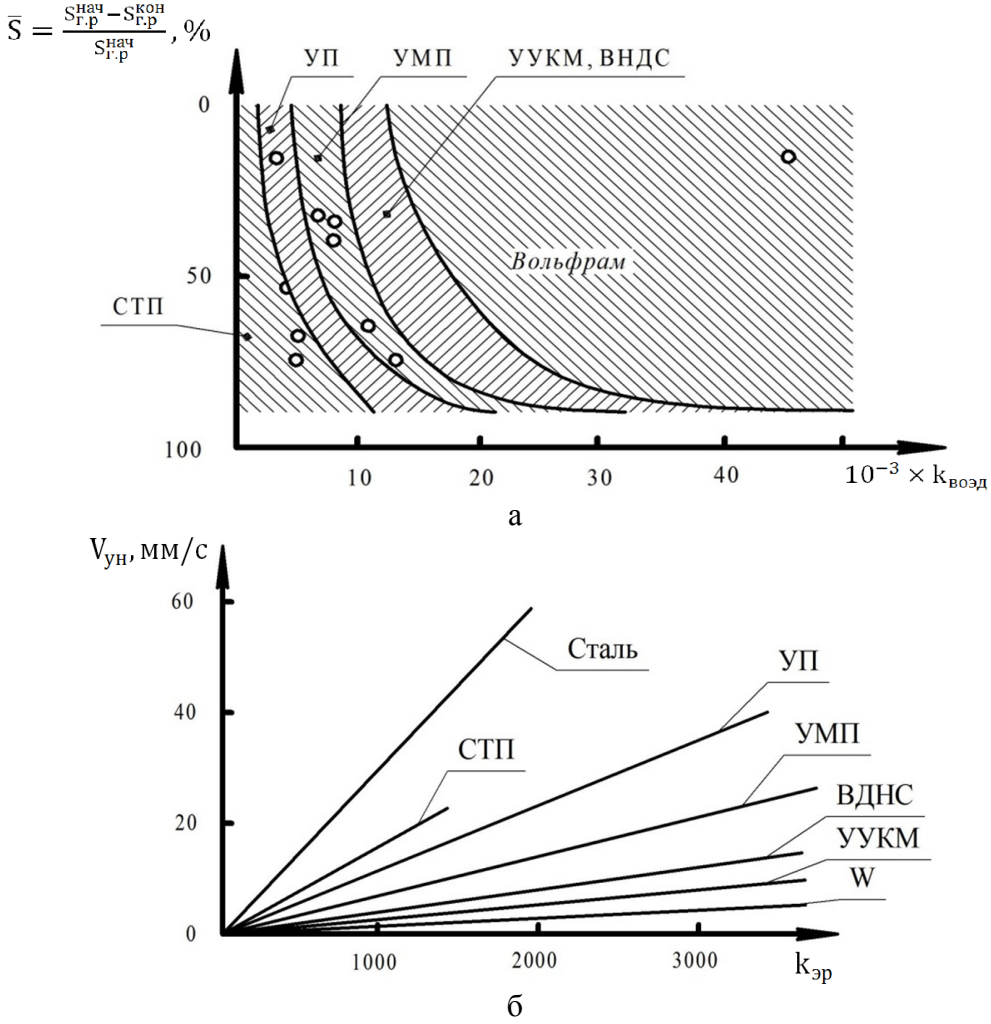

Рис. 3. Эмпирические зависимости, используемые при выборе материала руля:
а – области применения различных материалов в конструкции лопатки руля;
б – скорость уноса материала передней кромки руля в зависимости от критериального показателя $k_{эр}$;
СТП – стеклопластик; УП, УМП – углепластик; ВДНС – вольфрам-никелевый двухфазный сплав;
УУКМ – углерод-углеродные конструкционные материалы; W – вольфрам
Fig. 3. Empirical relations used while selecting material for a gas rudder:
a – fields of application of various materials in the rudder blade construction;
b – the rate of carry-over of the front edge of the rudder material depending on the criterion k_{er}:
STP – fiber glass; UP, UMP – carbon fiber; VNDS – tungsten-Nickel two-phase alloy;
CCCM – carbon - carbon composite material; W – wolfram

Интегральное воздействие потока на руль оценивается параметром

$$k_{эр} = z_{kf} P_{k\,max} q(\lambda_{kf}) \lambda_{kf}^2 \sqrt{T_k};$$

где z_{kf} – весовая доля частиц К-фазы в продуктах сгорания топлива в зоне установки газовых рулей; P_{kmax} – максимальное давление в камере двигателя в период работы рулей; λ_{kf} – приведенная скорость К-фазы; $q(\lambda_{kf})$ – приведенная плотность потока массы К-фазы; T_k – температура продуктов сгорания.

Далее необходимо найти коэффициент воздействия газовой струи на материал:

$$k_{возд} = k_{зр}t_{раб},$$

где $t_{раб}$ – время работы газового руля.

Исходя из условий работы газовых рулей БЛА, диапазон значений этого параметра для БЛА рассматриваемых классов составляет

$$k_{возд} < (5000 \div 7000).$$

Для найденного коэффициента $k_{возд}$ по графикам зависимостей, представленным на рис. 3, *а*, первоначально выбираем материал газового руля. В дальнейшем его выбор будет уточняться из условия эффективности работы материала в газовой среде.

Для выбранного материала газового руля по графику, приведенному на рис. 3, *б*, находим скорость уноса материала передней кромки руля $V_{ун}$.

Толщина материала, унесенного с передней кромки газового руля за время его работы определяется выражением

$$\delta_{пер} = V_{ун}t_{раб}.$$

С учетом найденного значения можно приближенно определить площадь материала передней кромки газового руля, унесенного в результате воздействия газового потока:

$$S_{ун} = \delta_{пер}L_{г.р},$$

где $L_{г.р}$ – размах газового руля.

Фактическую площадь газового руля найдем суммированием минимальной площади, при которой будет обеспечиваться необходимая сила для склонения БЛА, и площади унесенного материала руля:

$$S_{г.р} = S_{ун}S_{min}.$$

Опыт проектирования и применения газовых рулей показывает [2], что выбор материала был проведен корректно, если отношение площадей $S_{г.р}$ и S_{min} лежит в интервале

$$2 < \frac{S_{г.р}}{S_{min}} < 3.$$

Если данное условие (условие эффективности материала) не выполняется, возвращаемся на этап выбора материала руля и выбираем другой материал, с другой скоростью уноса.

При $\frac{S_{г.р}}{S_{min}} < 2$ можно сделать вывод о выборе слишком стойкого к воздействиям материала; применение подобного материала усложнит и удорожит конструкцию руля, что нерационально.

При $\frac{S_{г.р}}{S_{min}} > 3$ выбранный материал недостаточно стойкий, что приводит к необходимости создания рулей большей площади и массы.

Чтобы учесть неточность вычислений и некоторые упрощения, найденную площадь газового руля следует умножить на коэффициент запаса $k_з$:

$$S = S_{г.р}k_з.$$

Зная безразмерные параметры, характеризующие форму руля в плане: удлинение λ_k и сужение η_k, по известным соотношениям найдем геометрические параметры газового руля, соответственно, размах $L_{г.р}$, бортовую хорду b_b и концевую хорду b_k:

$$L_{г.р} = \sqrt{S_{г.р}\lambda_k}\ ;\ b_b = 2\frac{S_{г.р}}{L_{г.р}}\frac{2\eta_k}{\eta_k + 1}\ ;\ b_k = \frac{b_b}{\eta_k}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера рассмотрим решение задачи выбора конструкционного материала и внешней геометрии газового руля системы склонения БЛА при следующих исходных данных: $P_{уп}$ = 259,8 Н; $L_{уп}$ = 2,292 м; $P_{уп}^{\delta} = 0{,}02(^\circ)^{-1}$; $\delta = 25°$; W_a = 2472 м/с; $m_т$ = 297,6 кг; $\tau_{дв}$ = 15 с; $S_{ср} = 0{,}056$ м^2; $t_{раб}$ = 2,5 с; $\lambda_k = 0{,}75$; $\eta_k = 1{,}12$; $k_{эр}$ = 1500.

По приведенным выше соотношениям определяем $S_{min} = 1{,}217 \cdot 10^{-3}$ м^2.

По найденному значению коэффициента $k_{возд} = 3{,}75 \cdot 10^3$ по графику рис. 3, *а* выбираем конструкционный материал для искомого газового руля. Выбрав материал углепластик (УМП), по графику рис. 3, *б* находим скорость уноса. При значении $k_{эр}$ = 1500 скорость уноса $V_{ун} = 0{,}008$ м/с.

Далее определяем толщину и площадь материала передней кромки газового руля, унесенного в результате воздействия газового потока, и фактическую площадь газового руля. В данном случае:

$$\delta_{пер} = 0{,}02 \text{ м};\ S_{ун} = 1{,}98 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;\ S_{г.р} = 3{,}197 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Проверяем условие эффективности материала $\frac{S_{г.р}}{S_{min}} = 2{,}627$. Условие выполняется.

В заключение для выбранного конструкционного материала – УМП – определяем геометрические параметры газового руля:

$$S = 7{,}193 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;\ L_{г.р} = 0{,}073 \text{ м};\ b_b = 0{,}104 \text{ м};\ b_k = 0{,}092 \text{ м}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены проблемы выбора конструкционного материала и внешней геометрии газового руля системы склонения беспилотного летательного аппарата. При выборе конструкционного материала основным критерием является количество уносимого материала с поверхности газового руля в единицу времени. Основные потери материала происходят на передней кромке руля. С целью уменьшения этого негативного эффекта выбирают термоэрозионностойкий материал (графит, молибден и др.). На выбор геометрических параметров газового руля влияют характеристики газового потока, обтекающего руль. Конфигурация руля выбирается таким образом, чтобы обеспечить требуемое значение управляющей силы в конце работы руля с учетом ожидаемого выгорания его передней кромки.

Предложена методика выбора конструкционного материала и внешней геометрии газового руля системы склонения БЛА. Методика базируется на соотношениях, полученных на основании обработки экспериментальных данных воздействия газовых струй на рули, выполненных из разных конструкционных материалов.

Приведен пример решения задачи выбора конструкционного материала и внешней геометрии газового руля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспилотные летательные аппараты. Основы устройства и функционирования / П.П. Афанасьев, И.С. Голубев, С.Б. Левочкин, В.Н. Новиков, С.Г. Парафесь, М.Д. Пестов, И.К. Туркин; под ред. И.С. Голубева и И.К. Туркина. М.: МАИ, 2010. 654 с.

2. Проектирование зенитных управляемых ракет / И.И. Архангельский, П.П. Афанасьев, Е.Г. Болотов, И.С. Голубев, С.Б. Левочкин, А.М. Матвеенко, В.Я. Мизрохи, В.Н. Новиков, С.Н. Остапенко, В.Г. Светлов; под ред. И.С. Голубева, В.Г. Светлова. М.: Экслибрис-Пресс, 2013. 764 с.

3. Петраш В.Я., Коваленко А.И. Расчет параметров и характеристик летательных аппаратов с устройствами газодинамического управления. М.: Изд-во МАИ, 2003. 93 с.

4. Мизрохи В. Я. Проектирование управления зенитных ракет. М.: Экслибрис-Пресс, 2010. 252 с.

5. Тимаров А.Г., Ефремов А.Н., Бульбович Р.В. Численное моделирование влияния уноса газовых рулей на управляющие усилия // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2016. № 3. С. 47–51.

6. Дунаев В.А., Никитин В.А., Столбовской В.Н. Исследование влияния формы газового руля на величину потерь тяги в процессе работы РДТТ методом математического моделирования // Известия ТГУ. Технические науки. 2011. Вып. 2. С. 68–74.

7. Столбовской В.Н. Исследование влияния конструктивных параметров газового руля РДТТ и угла его поворота на потери тяги и управляющие усилия // Известия ТГУ. Технические науки. 2011. Вып. 2. С. 75–81.

8. Springer G.S., Yang C.I. A Model for the Rain Erosion of Fiber Reinforced Composites // AIAA Journal. 1975. No. 13. pp. 887–883.

9. Chen Q. Comparison of different k-ε models for indoor air flow computations // Numerical Heat Transfer. 1995. Part B. Vol. 28. pp. 353–369.

10. Yogesh M., Hari Rao A.N. Solid Particle Erosion response of fiber and particulate filled polymer based hybrid composites: A review // Journal of Engineering Research and Applications. Vol. 6, Issue 1 (Part 4). January 2016, pp. 25–39.

11. Парафесь С.Г., Виндекер А.В. Выбор материала и геометрических параметров газового руля системы склонения беспилотного летательного аппарата // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сб. тезисов докладов участников МНТК, посвященной 45-летию Университета. 18–20 мая 2016 года. М.: МГТУ ГА, 2016. С. 91.

12. Виндекер А.В., Парафесь С.Г. Выбор конструкционного материала и формы газового руля системы склонения беспилотного летательного аппарата // 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2016». 14–18 ноября 2016 года. Москва. Тезисы. М.: Типография «Люксор», 2016. С. 98–99.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Виндекер Александр Викторович, инженер Долгопрудненского научно-производственного предприятия, аспирант МАИ (национального исследовательского университета), jaguarrus90@mail.ru.

Парафесь Сергей Гаврилович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры авиационно-ракетных систем МАИ (национального исследовательского университета), s.parafes@mail.ru.

CHOICE OF STRUCTURAL MATERIAL AND EXTERNAL GAS RUDDER GEOMETRY OF DECLINATION SYSTEM OF UNMANNED AERIAL VEHICLE

Alexander V. Vindeker[1,2], Sergey G. Parafes[2]
[1]Dolgoprudny Research and Production Enterprise, Dolgoprudny, Russia
[2]Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

ABSTRACT

A choice of material and external geometry for gas rudder of the declination system of unmanned aerial vehicle are considered. When selecting material the main criterion is the quantity of the ablative material from the gas rudder surface in a unit of time. That is, the material should be chosen in such a way that when exposed to a gas jet the gas rudder is not burnt immediately, and ensures its efficiency during the entire time allotted to its work. The main material loss occurs at the leading edge of the gas rudder. The thermoerosion-resistant material (graphite, molybdenum, etc.) is chosen to reduce this harmful effect.

Characteristics of the gas flow around the rudder affect the selection of geometric parameters of the gas rudder. Obtaining the reliable results is hampered by uneven gas flow from the nozzle, the presence of unburned particles of the fuel, a blunt profile of the rudder; influence of its side edges on the flow around and interference with the nozzle walls. The configuration of the rudder shall be chosen to provide the desired value of the force at the completion of the work of the rudder with the expected burnout of its leading edge. The final decision on the choice of parameters of the gas rudder is based on the analysis of a large number of model and full-scale tests of the rudders-analogues.

The technique of the structural material choice and the external geometry of the gas rudder of the unmanned aerial vehicle declination system is proposed. The technique is based on the relations obtained on the basis of experimental data processing of gas jets impact on the rudders, made of different structural materials. An example of solving the problem of structural material and the external geometry choice of the gas rudder is given.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV), declination system, gas rudder, thermoerosion-resistant material, external geometry.

REFERENCES

1. **Afanas'yev P.P., Golubev I.S., Levochkin S.B., Novikov V.N., Parafes' S.G., Pestov M.D., Turkin I.K.** *Bespilotnye letatel'nye apparaty. Osnovy ustrojstva i funktsionirovaniya* [Unmanned aerial vehicles. Fundamentals of structure and functioning]. Ed. by I.S. Golubev and I.K. Turkin. M., MAI publ., 2010, 654 p. (in Russian)

2. Arhangel'skij I.I., Afanas'ev P.P., Bolotov E.G., Golubev I.S., Levochkin S.B., Matveenko A.M., Mizrohi V.Ya., Novikov V.N., Ostapenko S.N., Svetlov V.G. *Proektirovanie zenitnyh upravlyaemyh raket* [Design of anti-aircraft guided missiles]. Ed. by I.S. Golubeva, V.G. Svetlov. M., "Exlebris-press" Publishing house, 2013, 764 p. (in Russian)

3. Petrash V.Ya., Kovalenko A.I. *Raschet parametrov i harakteristik letatel'nyh apparatov s ustrojstvami gazodinamicheskogo upravleniya* [Calculation of parameters and characteristics of aircraft with gas-dynamic control devices]. M., MAI publ., 2003, 93 p. (in Russian)

4. Mizrohi V.Ya. *Proektirovanie upravleniya zenitnyh raket* [Design of control of anti-aircraft missiles]. M., "Exlebris-press" Publishing house, 2010, 252 p. (in Russian)

5. Timarov A.G., Efremov A.N., Bul'bovich R.V. *Chislennoye modelirovanie vliyaniye unosa gazovyh ruley na upravlayushie usiliya* [Numerical simulation of jet vane carry-over effect on steering effort]. *Vestnik Kontserna VKO "Almaz-Antey"* [Bulletin of the Concern "Almaz-Antei"], 2016, No. 3, pp. 47–51. (in Russian)

6. Dunaev V.A., Nikitin V.A., Stolbovskoy V.N. *Issledovanie vliyaniya formy gazovogo rulya na velichinu poter' tyagi v processe raboty RDTT metodom matematicheskogo modelirovaniya* [The research of the gas rudder form influence on draught losses size in the course of firm fuel rocket engine work by means of mathematical modeling]. *Izvestija Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [New of Tula State University. Technical sciences], 2011, Issue 2, pp. 68–74. (in Russian)

7. Stolbovskoy V.N. *Issledovanie vliyaniya konstruktivnih parametrov gazovogo rulya RDTT i ugla ego povorota na poteri tyagi i upravlyayushie usiliya* **[**The research of the gas rudder data influence of firm fuel rocket engine and its turn angle on draught losses and operating effort]. *Izvestija Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [New of Tula State University. Technical sciences], 2011, Issue 2, pp. 75–81. (in Russian)

8. Springer G.S., Yang C.I. A Model for the Rain Erosion of Fiber Reinforced Composites. AIAA Journal, 1975, No. 13, pp. 887–883.

9. Chen Q. Comparison of different k-ε models for indoor air flow computations. Numerical Heat Transfer, 1995, Part B, Vol. 28, pp. 353–369.

10. Yogesh M., Hari Rao A.N. Solid Particle Erosion response of fiber and particulate filled polymer based hybrid composites: A review. Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 6, Issue 1 (Part – 4), January 2016, pp. 25–39.

11. Parafes' S.G., Vindeker A.V. *Vybor materiala i geometricheskih parametrov gazovogo rulya sistemy skloneniya bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Choice of material and geometric parameters of a gas rudder of declination system of unmanned aerial vehicle]. *Grazhdanskaya aviaciya na sovremennom ehtape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva. Sbornik tezisov dokladov uchastnikov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii, posvyashchennoj 45-letiyu Universiteta*. 18–20 maya *2016 goda* [Civil Aviation on the modern stage of science, engineering, society development. A collection of participants' abstracts of the International scientific and technical Conference devoted to the 45th anniversary of the University]. May 18–20, 2016. M., MSTUCA publ., 2016, p. 91. (in Russian)

12. Parafes' S.G., Vindeker A.V. *Vybor kostruktsionnogo materiala I formy gazovogo rulya sistemy skloneniya bespilotnogo letatelnogo apparata* [Choice of structural material and forms of a gas rudder declination system for unmanned aerial vehicle]. *15-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya "Aviatsiya i kosmonavtika"* [The 15th International Conference "Aviation and Cosmonautics – 2016"] November 14–18th, 2016. Moscow, Abstracts, Printing house "Luxor", 2016, p. 99. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander V. Vindeker, Engineer of Dolgoprudny Research and Production Enterprise, Postgraduate Student of Moscow Aviation Institute (National Research University), jaguarrus90@mail.ru.

Sergey G. Parafes', Doctor of Technical Sciences, Professor of the Aviation & Rocket Systems Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), s.parafes@mail.ru.

Поступила в редакцию	13.09.2017	Received	13.09.2017
Принята в печать	28.12.2017	Accepted for publication	28.12.2017