

## **АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ВОЗДУШНОГО СУДНА И ГРУЗОВ**

В.Ю. СМИРНОВ

*Проведён анализ аэродинамической интерференции в системе «воздушное судно – крупногабаритный груз». Сформулированы основные положения концепции аэродинамической совместимости. Показано место исследований аэродинамической совместимости в системе исследований качества функционирования системы «воздушное судно – крупногабаритный груз».*

Одним из основных требований, предъявляемых к современным воздушным судам при десантировании крупногабаритных грузов, является широкий диапазон условий их применения. Существенным фактором, влияющим на этот диапазон, является аэродинамическая интерференция воздушного судна и крупногабаритных грузов. С аэродинамической точки зрения интерес представляет наружное размещение грузов на внешних подвесках, поскольку при внутреннем размещении в отсеках грузы не оказывают непосредственного влияния на аэродинамические нагрузки, действующие на воздушное судно.

В результате аэродинамической интерференции существенно изменяются как распределенные, так и суммарные аэродинамические нагрузки, действующие в системе «воздушное судно – крупногабаритный груз». При размещении крупногабаритных грузов на внешних подвесках изменяются аэродинамические характеристики воздушного судна, что приводит к изменению его летно-технических характеристик: управляемости, устойчивости дальности полёта, расходу топлива и т.д., а также эксплуатационно-технических характеристик, например, стоимости технической эксплуатации и др. В то же время воздушное судно оказывает, значительно большее влияние на грузы, размещенные на внешних подвесках, в результате чего существенно изменяются действующие на них аэродинамические силы и моменты.

Как свидетельствует практика эксплуатации воздушных судов и летные эксперименты, аэродинамическая интерференция может привести к изменению расчетной траектории движения груза в процессе отделения и как следствие к:

- столкновению грузов с воздушным судном и друг с другом;
- помпажу двигателя воздушного судна;
- снижению точности десантирования грузов и т.п.

Эти явления накладывают существенные ограничения на диапазон условий применения системы «воздушное судно – крупногабаритный груз», что делает задачу дальнейшего изучения аэродинамической интерференции в такой системе чрезвычайно актуальной и важной.

Вплоть до последнего времени основным источником информации об аэродинамических характеристиках являлись экспериментальные данные. В настоящее время при исследовании аэродинамической интерференции в системе «воздушное судно – крупногабаритный груз» все большее внимание уделяется методам математического моделирования, что обусловлено целым рядом факторов.

Во-первых, финансовые и временные затраты на проведение экспериментальных исследований существенно превосходят соответствующие затраты на математическое моделирование, что чрезвычайно важно в условиях современных рыночных отношений.

Во-вторых, экспериментальные исследования имеют существенные ограничения, например, не представляется возможным получить всю совокупность требуемых аэродинамических характеристик и практически невозможно проводить исследования в широком диапазоне условий применения системы «воздушное судно – крупногабаритный груз».

В-третьих, летный эксперимент, в отличие от математического моделирования, обладает высокой степенью риска для летного состава и авиационной техники.

Из вышесказанного вытекает актуальность проблемы создания математических моделей аэродинамической интерференции в системе «воздушное судно – крупногабаритный груз», которая решается в новой, более общей постановке как проблема разработки математического аппарата для обеспечения исследований аэродинамической совместимости воздушного судна и груза».

Десантирование крупногабаритных грузов, особенно в чрезвычайных ситуациях, должно обладать заданным уровнем эффективности и безопасности применения.

Функционирование системы «воздушное судно – крупногабаритный груз» определяется рядом показателей качества. Основными из них являются показатели эффективности и безопасности применения этой системы. Согласно технико-эксплуатационным требованиям, предъявляемым к системе «воздушное судно – крупногабаритный груз», эти показатели качества должны иметь значения не ниже заданных. Проведенный анализ показывает, что существенное влияние на величину этих показателей качества оказывает аэродинамическая интерференция в системе. Причем действие аэродинамических интерференционных сил и моментов может привести к тому, что требуемый уровень качества функционирования системы «воздушное судно – крупногабаритный груз» не будет обеспечиваться в некоторых условиях применения, например в чрезвычайных ситуациях, без использования дополнительных мер.

Таким образом, следствием подхода к проектированию системы «воздушное судно – крупногабаритный груз», когда летательный аппарат и груз, размещаемый на внешней подвеске, создаются независимо друг от друга, а затем объединяются в единую систему, является существенное уменьшение показателей эффективности рассматриваемой системы, одна из причин

которого состоит в наличии аэродинамической интерференции элементов системы. Следовательно, можно говорить об аэродинамической совместимости воздушного судна и крупногабаритного груза на внешней подвеске, понимая под этим, что в результате комплексирования летательного аппарата и груза обеспечивается заданный уровень всех показателей качества создаваемой системы «воздушное судно – крупногабаритный груз». Если в результате комплексирования не удастся выполнить требования к некоторым характеристикам рассматриваемой системы в силу аэродинамической интерференции летательного аппарата и груза, то воздушное судно и крупногабаритный груз на внешней подвеске являются частично аэродинамически совместимыми.

Формализуем введенное понятие аэродинамической совместимости воздушного судна и груза. Пусть  $\bar{Z}$  – вектор показателей качества функционирования системы «воздушное судно – крупногабаритный груз» размерности  $N$ , где  $N$  – количество частных показателей, характеризующих эффективность функционирования рассматриваемой системы:

$$\bar{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_N)^T = (V_{\min}, V_{\max}, H_{\min}, H_{\max}, L_{\max}, n_{y \max}, \dots, \\ V_{\min}^{(\text{груз})}, V_{\max}^{(\text{груз})}, H_{\min}^{(\text{груз})}, H_{\max}^{(\text{груз})}, n_{y \max}^{(\text{груз})}, \\ m_x^{(\text{груз})}, m_z^{(\text{груз})}, \sigma_x^{(\text{груз})}, \sigma_z^{(\text{груз})}, \dots, P_{\text{безоп}}^{(\text{груз})} \dots)^T$$

В состав этого вектора входят, например, следующие характеристики:

- диапазон скоростей полета воздушного судна  $V_{\min}$  и  $V_{\max}$ ;
- диапазон высот полета воздушного судна  $H_{\min}$  и  $H_{\max}$ ;
- максимальная дальность полета воздушного судна  $L_{\max}$ ;
- максимальная допустимая эксплуатационная перегрузка воздушного судна  $n_{y \max}$ ;
- показатели устойчивости и управляемости воздушного судна;
- диапазон условий применения груза каждого типа

$$(V_{\min}^{(\text{груз})}, V_{\max}^{(\text{груз})}, H_{\min}^{(\text{груз})}, H_{\max}^{(\text{груз})}, n_{y \max}^{(\text{груз})});$$

- точностные характеристики сброса груза каждого типа:

- математическое ожидание промаха ( $m_x^{(\text{груз})}, m_z^{(\text{груз})}$ );

- среднеквадратические ошибки промаха ( $\sigma_x^{(\text{груз})}, \sigma_z^{(\text{груз})}$ );

- характеристики безопасного сброса груза каждого типа  $P_{\text{безоп}}^{(\text{груз})}$

и так далее.

Согласно технико-эксплуатационным требованиям, предъявляемым к системе «воздушное судно – крупногабаритный груз» эти показатели качества должны иметь значения не ниже заданных, т.е. вектор показателей качества  $Z$  должен быть лучше вектора требуемых показателей качества  $Z_{\text{доп}}$ :

$$\bar{Z} \succ \bar{Z}_{\text{треб.}} : Z_i \succ Z_{\text{треб. } i} \quad \forall i = \overline{1, N}$$

где вектор  $\bar{Z}_{\text{доп.}}$  – вектор допустимых показателей качества функционирования системы «воздушное судно – крупногабаритный груз»:

$$\bar{Z}_{\text{треб.}} = (Z_{\text{треб.1}}, Z_{\text{треб.2}}, \dots, Z_{\text{треб.N}})^T$$

Как уже отмечалось выше, ряд частных показателей качества, то есть компонент вектора  $\bar{Z}$ , зависит от аэродинамической интерференции воздушного судна и груза. Таковыми, в частности, являются перечисленные выше характеристики, например, диапазон скоростей и высот полета воздушного судна, максимальная дальность полета и эксплуатационная перегрузка, показатели устойчивости и управляемости воздушного судна а также, в общем случае, и ряд других. Аналогичные показатели качества можно выделить и для груза каждого типа.

Таким образом, из вектора  $\bar{Z}$  можно выделить вектор  $\bar{Z}'$  размерности  $N' < N$ , компоненты которого являются функциями вектора аэродинамических характеристик системы «воздушное судно - крупногабаритный груз»  $\bar{A}$ :

$$\bar{Z}' = \bar{Z}'(\bar{A}) = \bar{Z}'(Z'_1(\bar{A}), Z'_2(\bar{A}), \dots, Z'_{N'}(\bar{A})) \subset \bar{Z}, \quad N' < N$$

Под аэродинамическими характеристиками системы «воздушное судно - крупногабаритный груз» понимаются, в частности, безразмерные коэффициенты аэродинамических сил и моментов, как всей системы, так и отдельных ее элементов:

$$\bar{A} = (c_y, c_z, m_x, m_y, m_z, \dots, c_y^{(\text{груз}_i)}, c_z^{(\text{груз}_i)}, m_x^{(\text{груз}_i)}, m_y^{(\text{груз}_i)}, m_z^{(\text{груз}_i)}, \dots)^T$$

где  $c_y = \frac{R_y}{\tilde{q}\tilde{S}}$ ,  $c_z = \frac{R_z}{\tilde{q}\tilde{S}}$ ,  $m_x = \frac{M_x}{\tilde{q}\tilde{S}l}$ ,  $m_y = \frac{M_y}{\tilde{q}\tilde{S}l}$ ,  $m_z = \frac{M_z}{\tilde{q}\tilde{S}l}$ ,

$l$  - характерный линейный размер;

$\tilde{S}$  - характерная площадь;

$\tilde{q} = \rho_\infty V_0^2 / 2$  - скоростной напор.

Следовательно, при разработке системы «воздушное судно – крупногабаритный груз» необходимо проведение исследований аэродинамической совместимости элементов этой системы, целью которого является обоснование диапазона изменения вектора аэродинамических характеристик  $\bar{A}$  рассматриваемой системы, который гарантирует заданный уровень частных показателей качества  $\bar{Z}'$ . Другими словами, в результате исследований аэродинамической совместимости необходимо определить векторы  $\bar{A}_{\text{min}}$  и  $\bar{A}_{\text{max}}$  такие, что при выполнении условия

$$\bar{A} \in \{\bar{A}\}^* = \{\bar{A} \mid \bar{A}_{\text{min}} \leq \bar{A} \leq \bar{A}_{\text{max}}\}$$

выполняется неравенство

$$\bar{Z}'(\bar{A}) \succ \bar{Z}'_{\text{треб.}}$$

Таким образом аэродинамическая совместимость – это свойство системы «воздушное судно – груз», заключающееся в том, что аэродинамическая интерференция в системе не препятствует достижению заданного уровня для всех показателей качества функционирования системы.

Исследование аэродинамической совместимости элементов системы «воздушное судно – груз» является задачей системного анализа. Условно это исследование можно разделить на три составляющие (рисунок 1). Нижний уровень исследований позволяет определить систему исходных данных для построения моделей функционирования системы. Создание моделей функционирования системы является задачей среднего уровня. На верхнем иерархическом уровне этого исследования определяются показатели качества функционирования системы «воздушное судно – груз».

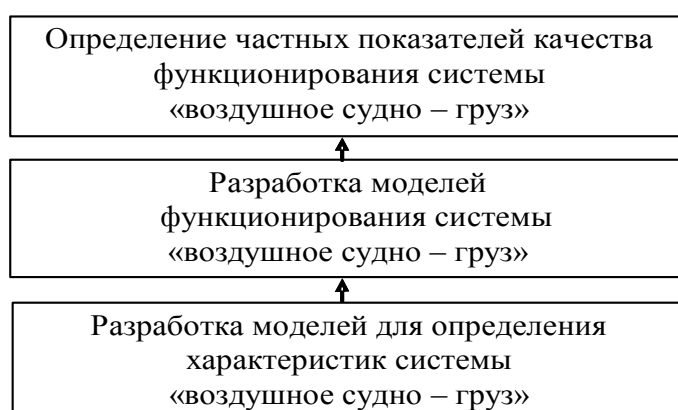


Рисунок 1. Этапы решения задачи исследования аэродинамической совместимости системы «воздушное судно – крупногабаритный груз»

Таким образом, для проведения исследований аэродинамической совместимости системы «воздушное судно – крупногабаритный груз» необходимо иметь в качестве исходных данных информацию о характеристиках системы, в частности, об ее аэродинамических характеристиках. Эти аэродинамические характеристики могут быть определены, например, с помощью разработанной методики расчета аэродинамического нагружения летательного аппарата и груза [1,2]. Указанная методика может служить инструментом для обеспечения комплексных исследований аэродинамической совместимости элементов системы «воздушное судно – крупногабаритный груз».

Применение разработанного математического аппарата может быть двояким: с одной стороны, его можно использовать для получения необходимых исходных данных об аэродинамических характеристиках системы «воздушное судно – крупногабаритный груз» для последующего анализа показателей качества функционирования системы, а с другой стороны, его целесообразно использовать при планировании исследований с целью снижения их объема и одновременного повышения информативности. При анализе показателей качества функционирования системы

«воздушное судно – крупногабаритный груз» задача исследования аэродинамической совместимости распадается на ряд частных подзадач, в процессе решения которых обеспечиваются частные показатели качества функционирования системы.

Исследования аэродинамической совместимости воздушного судна и груза направлены, в конечном итоге, на обеспечение требуемых показателей качества функционирования системы «воздушное судно – крупногабаритный груз», а именно, заданного уровня эффективности и безопасности системы. Проблема создания и совершенствования рассматриваемой системы состоит в определении её характеристик, обеспечивающих этот уровень. Исследования аэродинамической совместимости позволяют выявить, как влияют некоторые характеристики системы на показатели качества функционирования системы в целом. К числу этих характеристик относятся, например, геометрия воздушного судна и крупногабаритного груза, место и способ размещения груза на воздушном судне, способ отделения грузов, очередность их отделения и др.

Перечисленные характеристики системы «воздушное судно – крупногабаритный груз» можно характеризовать двумя векторами:

$\bar{C}$  - вектор параметров конструкции системы;

$\bar{D}$  - вектор параметров функционирования системы.

Из вектора  $C$  можно выделить вектор  $C'$ , параметры которого непосредственно определяют аэродинамические характеристики рассматриваемой системы  $\bar{A}$  (например, геометрия воздушного судна и крупногабаритного груза, место и способ размещения груза на воздушном судне и др.):

$$\bar{C}' \subset \bar{C}, \quad \bar{A} = \bar{A}(\bar{C}')$$

Из вектора  $D$  можно выделить вектор  $D'$ , компоненты которого сами зависят от аэродинамических характеристик рассматриваемой системы (например, способ отделения грузов от воздушного судна, очередность и последовательность их отделения и др.):

$$\bar{D}' \subset \bar{D}, \quad \bar{D}' = \bar{D}'(\bar{A}) = \bar{D}'(\bar{A}(\bar{C}'))$$

Принимая во внимание, что определение векторов  $\bar{C}$  и  $\bar{D}$  является одним из элементов обоснования облика системы «воздушное судно – крупногабаритный груз», можно сделать вывод, что исследования аэродинамической совместимости воздушного судна и груза являются одним из элементов обличковых исследований.

Математическое моделирование совместно с экспериментальными исследованиями позволяет определить зависимости  $\bar{A} = \bar{A}(\bar{C}')$  и  $\bar{D}' = \bar{D}'(\bar{A})$ . На основе этих зависимостей в результате исследований этапов функционирования системы «воздушное судно – крупногабаритный груз» определяется вектор частных показателей качества  $\bar{Z}'$  как функция характеристик облика системы

$\bar{C}'$  и  $\bar{D}'$ , что позволяет сделать вывод о степени аэродинамической совместимости воздушного судна и груза.

Далее исследователь может анализировать степень влияния тех или иных параметров на показатели качества системы. Исследования аэродинамической совместимости позволяет получить зависимость вектора частных показателей качества  $\bar{Z}'(\bar{C}', \bar{D}')$  от векторов  $\bar{C}'$  и  $\bar{D}'$ , что дает возможность исследователю принимать более адекватные решения о необходимости и степени изменения тех или иных характеристик системы «воздушное судно – крупногабаритный груз».

Процесс улучшения аэродинамической совместимости системы «воздушное судно – крупногабаритный груз» можно интерпретировать как задачу следующего типа: найти множества векторов  $\{\bar{C}'\}^*$  и  $\{\bar{D}'\}^*$ , которые доставляют максимум вектору частных показателей качества  $\bar{Z}'(\bar{C}', \bar{D}')$  на множестве аэродинамических характеристик, определяющем диапазон изменения вектора аэродинамических характеристик  $\bar{A}$  рассматриваемой системы, который гарантирует заданный уровень частных показателей качества  $\bar{Z}'$ :

$$\bar{Z}'(\bar{C}', \bar{D}') \xrightarrow{\bar{A}(\bar{C}') \in \{\bar{A} \mid \bar{A}_{\min} \leq \bar{A} \leq \bar{A}_{\max}\}^*} \max \Rightarrow \{\bar{C}'\}^*; \{\bar{D}'\}^*.$$

На основе сформулированных основных положений концепции аэродинамической совместимости был проведен анализ возможных путей ее повышения для различных систем «воздушное судно – крупногабаритный груз». Сформулированные основные положения концепции аэродинамической совместимости воздушного судна и груза позволяют проводить системный анализ конкретных систем с целью повышения уровней эффективности и безопасности их эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов В.Ю. Расчет нестационарных аэродинамических характеристик грузов на дозвуковых скоростях полета // Установки и системы управления авиационным вооружением. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1994, с. 103-107.
2. Смирнов В.Ю. Расчет линейных стационарных и нестационарных аэродинамических характеристик АСП на дозвуковых и сверхзвуковых скоростях полета // Установки и системы управления авиационным вооружением. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1994, с. 108-117.
3. Смирнов В.Ю. Аэродинамическая совместимость воздушного судна и крупногабаритных грузов. Тезисы доклада // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества, Международная научно-техническая конференция. – М.: МГТУ ГА, 2006, с 94.

*Смирнов Владимир Юрьевич, заведующий кафедрой факультета военного обучения Московского авиационного института (государственного технического университета), к.т.н., доцент.*