

Вычислительные модели в задачах проектирования топливных систем самолетов

Л. Л. Вышинский, Ю. А. Флеров

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

Аннотация. Статья посвящена вопросам автоматизации задач весового проектирования самолетов, относящимся к расчетным задачам массово-инерционных характеристик топлива, размещаемого на борту летательных аппаратов. Описаны основные вычислительные модели, применяемые в этих расчетах, представлена программная реализация модуля расчета характеристик топлива в составе Автоматизированной Системы Весового Проектирования (АСВП) летательных аппаратов.

Ключевые слова: вычислительные модели, автоматизация проектирования, весовое проектирование, топливная система, генератор проектов, архитектура клиент-сервер.

DOI 10.14357/20718632220208

Введение

Топливная система самолета (и других летательных аппаратов, далее ЛА) предназначена для размещения и бесперебойной подачи топлива к двигателям ЛА. Масса топлива составляет значительную долю в общей массе изделия. При этом она изменяется в полете, что существенно влияет на центровку (положение центра масс), устойчивость и управляемость ЛА. Поэтому расчеты массово-инерционных характеристик (МИХ) топлива, зависящих от размещения топлива на борту, от процедур заправки, выработки, дозаправки и слива топлива, является важными задачами весового проектирования. Размещение топливных баков на борту, текущие объемы топлива во всех баках, которые определяются автоматикой топливной системы, должны обеспечивать выполнение ограничений по центровке для всех взлетных, полетных и посадочных вариантов полезной нагрузки ЛА.

1. Размещение топлива в летательных аппаратах

Проектирование топливной системы ЛА начинается с определения состава, структуры и положения топливных емкостей на борту. На Рис. 1 представлена структура топливных емкостей самолета. У современных самолетов они представляют собой агрегаты, которые могут иметь достаточно сложные формы и конструкцию.

Баки, как правило, встроены в конструкции основных агрегатов – крыла, фюзеляжа, килей, используя панели обшивки и другие конструкции в качестве своих границ. В составе топливной системы кроме стационарных и встроженных, баков могут использоваться подвесные и вкладные топливные баки. Они могут состоять из свободно сообщающихся или изолированных отсеков. Баки могут быть соединены трубопроводами, по которым топливо перетекает самотеком или перекачивается управляемыми

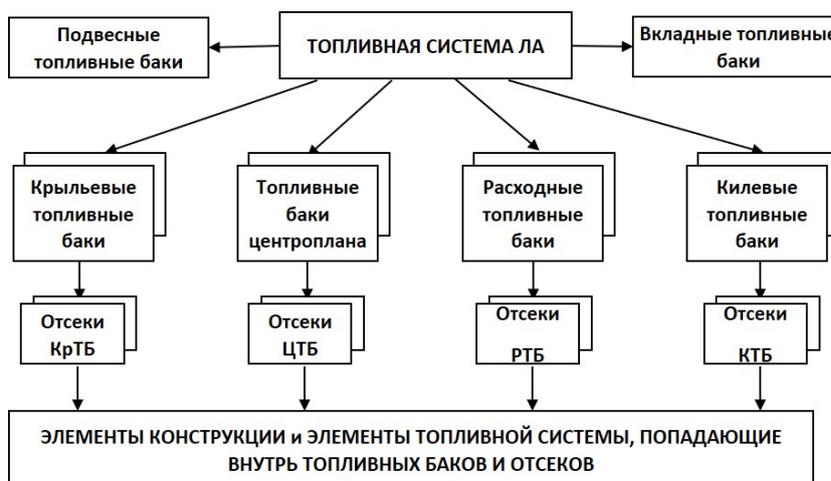


Рис. 1. Система топливных емкостей летательного аппарата

автоматикой насосами. Система перекачки топлива должна, с одной стороны, обеспечивать бесперебойную и равномерную подачу топлива в двигатели, а с другой - не допускать критического отклонения центровки ЛА при выработке или заправке топлива.

Топливные баки состоят из силовых и конструктивных элементов, образующих замкнутые объемы, а также включают в себя различные элементы топливной системы (и, возможно, других систем), размещаемые внутри топливных отсеков. На Рис. 1 конструктивные элементы баков, которые необходимо принимать во внимание при расчетах располагаемых объемов и других характеристик топлива, показаны одним общим блоком, хотя, каждый такой элемент должен быть описан отдельно.

Каждый топливный бак и топливные отсеки баков характеризуется своими свойствами - атрибутами, параметрами и характеристиками, список которых включает:

- обозначение элемента структуры - номер или шифр группы топливных баков, топливного бака или отсека топливного бака;
- полное наименование элемента структуры;
- положение топливного бака или отсека топливного бака в системе координат ЛА;
- габаритная модель топливного бака или отсека, используемая на начальных этапах проектирования, при компоновке ЛА и отображаемая на форме в плане, на фронтальной и боковой проекциях;

- геометрическая модель топливного бака, точнее - геометрия его границ;

- $V_{\text{теор}}$ - теоретический объем топливного бака (вычисляется по заданию его геометрической модели);

- V - реальный располагаемый объем топливной емкости, который отличается от $V_{\text{теор}}$ за счет внутренних конструкций, вытесняющих некоторый объем топлива;

- $K_{\text{констр}}$ - коэффициент полезного объема топливной емкости. На начальных этапах проектирования, когда состав топливных емкостей уже определен и в первом приближении задан их теоретический объем, но детали конструкции еще не проработаны, коэффициент $K_{\text{констр}}$ задается эмпирически на основании предыдущего опыта проектирования аналогичных конструкций топливной системы. На стадии рабочего проектирования коэффициент полезного объема топливных емкостей вычисляется при расчетах реальных конструкций - $K_{\text{констр}} = V/V_{\text{теор}}$;

Основными МИХ топлива, которое может быть размещено в топливных емкостях, контролируемые в процессе проектирования топливной системы являются:

- ρ - плотность размещаемого топлива,
- m - максимально возможная масса размещаемого топлива,

X_m, Y_m, Z_m - положение центра масс топлива в системе координат ЛА (СК ЛА),

P_x, P_y, P_z – статические моменты топлива относительно осей СК ЛА ($P_x = m \cdot X_m, P_y = m \cdot Y_m, P_z = m \cdot Z_m$),

I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} – полные осевые моменты инерции топлива в СК ЛА,

I_{xy}, I_{xz}, I_{yz} – полные центробежные моменты инерции в СК ЛА.

Для расчета МИХ переменного объема топлива ЛА в процессе его функционирования рассчитываются так называемые **тарировочные характеристики топливных емкостей** – функциональные зависимости МИХ топлива от уровня заполнения бака h^t , углов тангажа θ и крена γ летательного аппарата:

$X_m^t(h^t, \theta, \gamma), Y_m^t(h^t, \theta, \gamma), Z_m^t(h^t, \theta, \gamma)$ – положение центра масс,

$P_x^t(h^t, \theta, \gamma), P_y^t(h^t, \theta, \gamma), P_z^t(h^t, \theta, \gamma)$ – статические моменты,

$I_{xx}^t(h^t, \theta, \gamma), I_{yy}^t(h^t, \theta, \gamma), I_{zz}^t(h^t, \theta, \gamma)$ – осевые моменты инерции,

$I_{xy}^t(h^t, \theta, \gamma), I_{xz}^t(h^t, \theta, \gamma), I_{yz}^t(h^t, \theta, \gamma)$ – центробежные моменты инерции,

где $h_{min} \leq h^t \leq h_{max}, -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2, -\pi/2 \leq \gamma \leq \pi/2$.

В качестве независимой переменной в тарировочных характеристиках вместо уровня может быть использована текущая масса топлива m^t .

2. Расчет массово-инерционных характеристик топлива

Объем, масса и другие МИХ реального объема топлива, заполняющего топливную емкость T , определяется геометрией этой емкости и геометрией объектов конструкций K_i , находящихся внутри границ $T_{теор}$ топливной емкости. Расчеты теоретического и реального объема, а следовательно, и массы топлива сводятся к вычислению тройных интегралов по трехмерным областям, описываемых геометрией объектов T и K_i :

$$m = \rho * \left(V_{теор} - \sum_i V_i \right),$$

$$V_{теор} = \iiint_{T_{теор}} dx dy dz, V_i = \iiint_{K_i} dx dy dz$$

Тройные интегралы по формуле Остроградского-Гаусса сводятся к интегралам по поверхности, ограничивающей область интегрирования. В частности, для вычисления объемов справедливо равенство:

$$V = \iiint_T dx dy dz = \iint_S \frac{1}{3} (\vec{r}, \vec{\nu}) dS,$$

где S – поверхность, являющаяся границей области T , $\vec{r} = (x, y, z)$ – радиус-вектор точки на поверхности S , а $\vec{\nu}$ – нормаль к поверхности в этой точке. Заметим, что если область T имеет полости, то внутренняя поверхность этой полости входит в S . При этом, вектор нормали всегда направлен вовне области T . Подынтегральное выражение $\frac{1}{3} (\vec{r}, \vec{\nu}) dS$ представляет собой объем элементарной пирамиды с основанием площади dS , расположенным на поверхности тела, и вершиной в начале системы координат. Скалярное произведение $(\vec{r}, \vec{\nu})$ определяет с каким знаком учитывается данный объем в сумме объемов всех элементарных пирамид, построенных на поверхности, ограничивающей область.

2. Триангуляция поверхности 3-D объектов

Численный метод вычисления поверхностных интегралов зависит от того, каким способом задается поверхность трехмерного объекта. В практике проектирования ЛА на разных этапах могут использоваться разные геометрические модели задания формы топливных емкостей. На ранних этапах могут применяться простые габаритные модели, для которых МИХ могут вычисляться по формулам. При более детальной проработке компоновочной схемы ЛА возможно использование т.н. каркасных геометрических моделей – массивы точек и сечений, между которыми натягивается «проволочный» каркас поверхности трехмерного объекта. На стадии разработки рабочей документации, когда создается электронный макет изделия в рамках специальных PDM-систем, используются более сложные технологии построения и описания трехмерных объектов. Основным требованием к геометрическим моделям описания топливных емкостей является простота при

расчете объемов, масс и других МИХ. Существует ряд методов расчетов МИХ трехмерных объектов. Одним из таких способов, наиболее часто применяемых в решении практических задач, является приближение 3-D объектов многогранниками. Точность аппроксимации трехмерных тел многогранниками зависит как от числа вершин в многограннике, так и от способа построения граней. Универсальным типом многогранников, аппроксимирующих 3-D объекты, являются те из них, у которых все грани являются треугольниками. Для любых трехмерных тел может быть построен многогранник с треугольными гранями. Это следует из того, что любая грань многогранника может быть триангулирована, т.е. представлена в виде некоторого множества треугольников.

Многогранники с триангулированными гранями здесь будем называть триангуляционными многогранниками.

Задание триангуляционных многогранников максимально просто. Это массив треугольных граней многогранника, каждая из которых представлена тремя своими вершинами:

$$T = \{G_i = (A_i = \langle A_i.x, A_i.y, A_i.z \rangle, \\ B_i = \langle B_i.x, B_i.y, B_i.z \rangle, \\ C_i = \langle C_i.x, C_i.y, C_i.z \rangle)\}$$

Рассмотрим в качестве примера триангуляционного многогранника треугольную пирамиду с вершиной в точке H и с треугольником в основании, где его вершины A, B и C заданы в порядке обхода по часовой стрелке., если смотреть на основание пирамиды из ее вершины. Тогда такой триангуляционный многогранник задан следующим набором граней:

$$T_{HABC} = \{G_1 = (A, B, C), G_2 = (A, H, B), \\ G_3 = (B, H, C), G_4 = (C, H, A)\}.$$

Порядок задания вершин в треугольных гранях триангуляционного многогранника является существенным аспектом описания 3-D объектов. Это связано с той геометрической интерпретацией поверхностного интеграла, которая была приведена выше. Для вычисления поверхностного интеграла важно знать вектор нормали к поверхности в каждой точке, а в многограннике, аппроксимирующем 3-D объект, нормаль определяется не в каждой точке

поверхности многогранника, а для каждой грани. Вектор нормали должен быть направлен вовне тела 3-D объекта. Для любой треугольной грани нормаль может быть вычислена как векторное произведение двух векторов, направленных вдоль сторон треугольника, деленное на удвоенную площадь грани. Для правосторонней системы координат вектор нормали имеет следующий вид:

$$\vec{n} = [(\overline{AB}), (\overline{AC})] / (2 * S_{ABC}).$$

При аппроксимации 3-D объектов триангуляционными многогранниками поверхностные интегралы, приведенные выше, вычисляются как алгебраическая сумма вычисленных по арифметическим формулам соответствующих характеристик треугольных пирамид, построенных на его треугольных гранях в качестве основания и с вершинами в начале системы координат.

В современных системах геометрического моделирования трехмерных объектов предусмотрен экспорт геометрических данных 3-D объектов в триангуляционных форматах. В частности, такие системы геометрического моделирования, как NX, CATIA, TFLEX-CAD и другие допускают выгрузку 3-D объектов в форматах *.stl и *.obj, которые задают триангуляционное представление тел. В частности, формат *.stl представляет собой массив треугольников – граней (facet), задаваемых в следующем виде:

```
facet normal 1.766300e-02 -9.998440e-01 -
2.771081e-07
  outer loop
  vertex 8.209815e+03 6.576881e+01 -
4.126503e+01 - (A.x A.y A.z)
  vertex 8.214862e+03 6.585797e+01 -
4.219013e+01 - (B.x B.y B.z)
  vertex 8.217190e+03 6.589909e+01 -
2.182181e+01 - (C.x C.y C.z)
endloop endfacet
```

Здесь заданы координаты нормали к грани (normal) и координаты трех точек грани (vertex). Нормаль задает ориентацию грани. В принципе, ориентация грани может задаваться порядком обхода точек в треугольнике. Но задание вектора–нормали здесь может быть полезно для контроля задаваемой информации.

4. Операции над триангуляционными многогранниками

Как сказано выше, реальный располагаемый объем топлива в топливной емкости определяется путем вычитания из теоретического объема емкости объемов, вытесненных размещенными внутри элементами конструкций. $V = (V_{\text{теор}} - \sum_i V_i)$. Это справедливо, если элемент конструкции целиком находится внутри теоретического объема. Однако некоторые конструкции могут входить своими частями в соседние отсеки или просто выходить за границы бака или топливного отсека. При этом, вычленение этих частей может быть затруднительно или требовать дополнительных построений. Для триангуляционных моделей существуют библиотеки процедур, которые выполняют над ними теоретико-множественные операции. Рассмотрим три основных теоретико-множественных операции:

\cup – объединение триангуляционных многогранников, операция построения нового триангуляционного многогранника, который содержит все точки объединяемых 3-D объектов;

\cap – пересечение триангуляционных многогранников, операция построения нового триангуляционного многогранника, который содержит все точки, каждая из которых принадлежит всем пересекаемым 3-D объектам;

\setminus – вычитание одного триангуляционного многогранника из другого, операция построения нового триангуляционного многогранника, который содержит те, и только те точки уменьшаемого 3-D объекта, которые не принадлежат вычитаемому 3-D объекту.

Перечисленные операции связаны с анализом взаимного расположения пространственных треугольников-граней многогранников и с построением новых граней результирующего многогранника. Эти операции в общем случае требуют порядка $M \times N$ непростых вычислений, где M и N – числа граней в операндах. Задача вычисления располагаемого объема топливной емкости с учетом внутренних конструкций в общем случае сводится к следующей суперпозиции рассмотренных операций: $T = T_{\text{теор}} \setminus (\cup_i K_i)$. Результатом такой операции будет триангуляционная

модель сложного 3-D объекта с внутренними полостями, отражающая реальный объем топлива, заполняющего топливную емкость. Это не простая операция, которую целесообразно выполнять с помощью специализированных программ. В частных случаях простые теоретико-множественные операции могут и должны выполняться при решении задач весового проектирования. Такой относительно простой операцией является сечение триангуляционного многогранника плоскостью. Эта задача решается при расчетах тарировочных характеристик, при расчете распределенных характеристик, при разделении большого бака на составляющие технологические отсеки. Задача рассечения триангуляционного многогранника произвольной плоскостью сводится к сортировке граней, попадающих в разные полупространства, образованные плоскостью, в рассечении треугольных граней, лежащих в обоих полупространствах, и построении новых граней в плоскости рассечения.

Последовательным применением операции сечения многогранника плоскостью решается задача расчета распределенных характеристик топлива, попадающего в некоторую область, ограниченную рядом плоскостей. Эта же задача может быть решена путем применения операции пересечения, выполняемой над исходным топливным баком и отсеком разбиения ЛА на геометрические 3-D области.

5. Расчетные формулы характеристик топливных емкостей

Учитывая все сказанное, можно сделать следующий вывод: расчетной геометрической моделью для построения МИХ топлива может служить триангуляционная модель топлива, находящегося внутри топливной емкости. В общем случае масса топливного бака или группы баков может быть выражена формулой $m = \rho * \sum_j V_{\Pi_j}$

Здесь Π_j – треугольные пирамиды, построенные на гранях триангуляционного многогранника. Заметим, что одни из слагаемых в приведенных суммах будут положительными, а другие отрицательными. Статические моменты

и моменты инерции в силу аддитивности этих характеристик, аналогично объемам, вычисляются как суммы соответствующих характеристик пирамид, построенных на гранях 3-D триангуляций объектов:

$$P_x = \sum_j P_x(\Pi_j), P_y = \sum_j P_y(\Pi_j), \\ P_z = \sum_j P_z(\Pi_j) - \text{статические моменты,}$$

$$I_{xx} = \sum_j I_{xx}(\Pi_j), I_{yy} = \sum_j I_{yy}(\Pi_j), \\ I_{zz} = \sum_j I_{zz}(\Pi_j) - \text{осевые моменты,}$$

$$I_{xy} = \sum_j I_{xy}(\Pi_j), I_{xz} = \sum_j I_{xz}(\Pi_j), \\ I_{yz} = \sum_j I_{yz}(\Pi_j) - \text{центробежные моменты.}$$

Координаты центра масс 3-D объекта рассчитываются по вычисленным значениям массы и статических моментов по следующим формулам:

$$X_m = P_x/m, Y_m = P_y/m, Z_m = P_z/m.$$

Объем, статические моменты и моменты инерции треугольной пирамиды, вершины

которой заданы точками в координатных осях ЛА, определяются по известным формулам.

Рассмотрим треугольные пирамиды, одна из вершин которых совпадает с началом системы координат. Объем таких пирамид равен 1/6 детерминанта матрицы, составленной из строк с координатами вершин основания таких пирамид A, B, C .

$$V(\Pi) = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} A.x & A.y & A.z \\ B.x & B.y & B.z \\ C.x & C.y & C.z \end{vmatrix}$$

При этом, порядок строк в матрице должен соответствовать тому порядку обхода вершин треугольника, который вместе с нормалью к поверхности соответствует описанному выше правилу. Суммирование объемов всех пирамид, построенных на гранях триангуляционных многогранников 3-D объекта с учетом их знаков, даст полный объем этого объекта.

Также должны суммироваться для всех граней статические моменты и моменты инерции построенных пирамид, вычисляемые по приведенным ниже формулам.

$$P_x(\Pi) = \rho \cdot V(\Pi) \cdot \frac{A.x+B.x+C.x}{4}, \\ P_y(\Pi) = \rho \cdot V(\Pi) \cdot \frac{A.y+B.y+C.y}{4}, \\ P_z(\Pi) = \rho \cdot V(\Pi) \cdot \frac{A.z+B.z+C.z}{4}, \\ I_{xx}(\Pi) = \rho \cdot V(\Pi) \cdot \frac{(A.x+B.x+C.x)^2+(A.x)^2+(B.x)^2+(C.x)^2}{20}, \\ I_{yy}(\Pi) = \rho \cdot V(\Pi) \cdot \frac{(A.y+B.y+C.y)^2+(A.y)^2+(B.y)^2+(C.y)^2}{20}, \\ I_{zz}(\Pi) = \rho \cdot V(\Pi) \cdot \frac{(A.z+B.z+C.z)^2+(A.z)^2+(B.z)^2+(C.z)^2}{20}, \\ I_{xy}(\Pi) = \rho \cdot V(\Pi) \cdot \frac{(A.x+B.x+C.x) \cdot (A.y+B.y+C.y) + A.x \cdot A.y + B.x \cdot B.y + C.x \cdot C.y}{20}, \\ I_{yz}(\Pi) = \rho \cdot V(\Pi) \cdot \frac{(A.y+B.y+C.y) \cdot (A.z+B.z+C.z) + A.y \cdot A.z + B.y \cdot B.z + C.y \cdot C.z}{20}, \\ I_{xz}(\Pi) = \rho \cdot V(\Pi) \cdot \frac{(A.x+B.x+C.x) \cdot (A.z+B.z+C.z) + A.x \cdot A.z + B.x \cdot B.z + C.x \cdot C.z}{20}.$$

6. Тарировочные характеристики топливных емкостей

Задача тарировки топливных емкостей связана с расчетами массово-инерционных характеристик топлива в процессе его выработки или заправки, т.е. при не полностью заполненной топливной емкости. Обычно под тарировкой различных приборов, измеряющих уровень жидкости в емкости, понимается построение зависимости объема (массы) жидкости от показаний датчиков, измеряющих текущее положение зеркала поверхности жидкости. В летательных аппаратах в силу нестационарности топлива в полете, его колебаний, зеркало топлива в баке, как правило, не будет плоской поверхностью. Это обстоятельство может влиять на процессы подачи топлива и его перекачки. Однако в задачах весового проектирования этой нестационарностью можно пренебречь, и зеркало топлива рассматривается как плоская поверхность, параллельная земле.

В летательных аппаратах показания топливомеров зависят не только от текущего объема топлива в баке, но и от эволюций летательного аппарата в полете и расположения датчиков топливомера внутри топливной емкости. Поэтому, для построения тарировочных характеристик целесообразно не связывать в базовых расчетах положение зеркала топлива по высоте с показаниями топливомеров, а задавать в некоторых относительных величинах. На Рис. 2 показано положение зеркала топлива в земной системе координат.

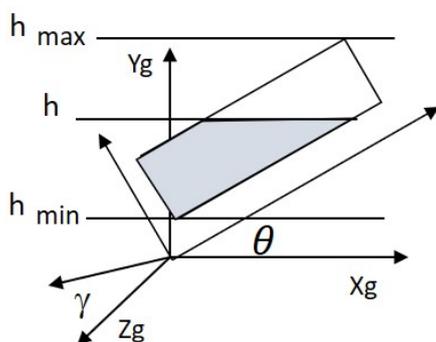


Рис. 2. Положение в пространстве топливного бака и зеркало его поверхности

Диапазон возможных положений зеркала зависит от углов тангажа (θ) и крена (γ). Положение зеркала топлива определяется крайними точками триангуляционного многогранника топливной емкости в земной системе координат:

$$h_{min} = \min_i (A_i \cdot x \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\gamma) + A_i \cdot y \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\gamma) + A_i \cdot z \cdot \sin(\gamma))$$

$$h_{max} = \max_i (A_i \cdot x \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\gamma) + A_i \cdot y \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\gamma) + A_i \cdot z \cdot \sin(\gamma))$$

Поскольку диапазон возможных положений зеркала топлива зависит от положения топливной емкости в земной системе координат, то удобнее задавать его положение значением безразмерной величины η , определяемой следующим отношением:

$$\eta = \frac{h - h_{min}}{h_{max} - h_{min}}, \quad 0 \leq \eta \leq 1.$$

Заметим, что наклонное положение зеркала относительно земной системы координат, возникающее из-за динамических перегрузок, можно имитировать корректировкой углов тангажа и крена. То же относится и к корректировке тарировочных характеристик из-за прогиба крыла и других возможных деформаций конструкции ЛА. Таким образом, задача тарировки в целом сводится к расчету базовых тарировочных характеристик как функций трех переменных при фиксированной плотности топлива ρ :

$$\text{МИХ}_{\text{тар}} = \Phi(\eta, \theta, \gamma)$$

Употребление термина базовая тарировочная характеристика (или функция) обосновано тем, что эта функция может быть использована для расчетов любых других характеристик топлива в процессах заправки, выработки, аварийного слива и для других задач. Например, для анализа центровки при выполнении типовых профилей полета или при детальном разборе случившихся критических полетных ситуаций.

Функция $\Phi(\eta, \theta, \gamma)$ может быть реализована в виде вычислительной процедуры, а может быть использована для расчета и хранения массива данных с достаточно подробной сеткой значений η, θ, γ . Например, на сетке размерностью $[100, 100, 100]$ массив, содержащий 10^6 записей типа

$$\langle m, X_m, Y_m, Z_m, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, I_{xy}, I_{xz}, I_{yz} \rangle,$$

может быть рассчитан за приемлемое время. В современных технологиях такие массивы данных называют информационными кубами и существуют развитые средства работы с ними, т.н. OLAP-технологии (On-Line Analytical Processing — интерактивный анализ данных).

Поскольку двумерные устройства вывода (экраны монитора или принтеры) не могут адресовать три измерения, более практичным является проецирование «срезов» информационного куба (проецирование понимается в смысле уменьшения количества измерений матрицы — куба), возможно в виде двумерных таблиц при фиксированном значении одной или двух переменных. На Рис. 3 приведен пример тарифовочной характеристики топливного бака, у которой фиксируются нулевые значения углов тангажа и крена.

Функция $\Phi(\eta, \theta, \gamma)$ в процедурном или в табличном виде может быть использована для многих расчетов, например, для градуировки показаний, упомянутых выше топливомеров, и вообще для разработки устройств и компьютерных программ управления, в частности, для программ, управляющих процессами заправки, перекачки, выработки и слива топлива. Для построения таких программ удобнее пользоваться данными с послойным представлением всего объема топлива, в которых вычисляются все характеристики тонкого слоя топлива.

При достаточно мелком шаге по уровню, и по сетке углов тангажа и крена, базовые таблицы позволяют проводить с достаточной точно-

стью любые расчеты МИХ топлива путем интерполяции. Если сетка значений входных параметров расчета недостаточна для нужной точности расчетов, нужно использовать процедуру вычисления функции $\Phi(\eta, \theta, \gamma)$ для прямых расчетов, с возможным применением методов последовательных приближений. Примером решения задач такого типа является расчет МИХ заданной массы топлива в баке при фиксированных значениях углов тангажа и крена. Эта задача сводится к численному решению уравнения $m^* = \Phi.m(\eta, \theta^0, \gamma^0)$ относительно η , и вычислению $\Phi(\eta^*, \theta^0, \gamma^0)$ для полученного решения η^* . Аналогичным образом решается задача нахождения МИХ топлива, когда положение зеркала топлива в баке задается некоторой точкой на плоскости и углами тангажа и крена. Сначала вычисляется параметр η^* , а затем идет обращение к процедуре вычисления МИХ. Вопрос удобства задания исходной информации при решении любых задач является важным аспектом при построении программных средств повседневных инженерных расчетов. В связи с этим, возможно, будет более удобным инструментом в весовых расчетах построение на основе массива данных $\Phi(\eta, \theta, \gamma)$ другого OLAP-куба характеристик топливных баков с массой в качестве одной из координат этого куба:

$$\text{МИХ}_{\text{тар}} = F(\mu, \theta, \gamma),$$

где $\mu = i \cdot \delta\mu, 0 \leq \mu \leq m, m$ - масса топлива в баке, а $\delta\mu$ – принятый шаг сетки куба по массе. Для удобства решения задач, связанных с вы-

| Уровень | AlO | GmO | M | Xцт | Yцт | Zцт | Моменты | IX | IY | IZ | IXY |
|---------|-----|-----|---------|-------|------|-------|---------|--------|----------|----------|--------|
| 1.00 | 0.0 | 0.0 | 960.000 | 14.00 | 0.15 | -1.30 | Полные | 1702.4 | 191113.6 | 189468.8 | 2016.0 |
| 0.97 | 0.0 | 0.0 | 928.000 | 14.00 | 0.15 | -1.30 | Полные | 1643.8 | 184743.2 | 183151.4 | 1883.8 |
| 0.93 | 0.0 | 0.0 | 896.000 | 14.00 | 0.14 | -1.30 | Полные | 1585.4 | 178372.7 | 176834.1 | 1756.2 |
| 0.90 | 0.0 | 0.0 | 864.000 | 14.00 | 0.14 | -1.30 | Полные | 1527.2 | 172002.3 | 170517.0 | 1633.0 |
| 0.87 | 0.0 | 0.0 | 832.000 | 14.00 | 0.13 | -1.30 | Полные | 1469.2 | 165631.8 | 164200.1 | 1514.2 |
| 0.83 | 0.0 | 0.0 | 800.000 | 14.00 | 0.13 | -1.30 | Полные | 1411.3 | 159261.4 | 157883.4 | 1400.0 |
| 0.80 | 0.0 | 0.0 | 768.000 | 14.00 | 0.12 | -1.30 | Полные | 1353.6 | 152890.9 | 151566.8 | 1290.2 |
| 0.77 | 0.0 | 0.0 | 736.000 | 14.00 | 0.12 | -1.30 | Полные | 1296.1 | 146520.4 | 145250.3 | 1185.0 |
| 0.73 | 0.0 | 0.0 | 704.000 | 14.00 | 0.11 | -1.30 | Полные | 1238.7 | 140150.0 | 138934.0 | 1084.2 |
| 0.70 | 0.0 | 0.0 | 672.000 | 14.00 | 0.11 | -1.30 | Полные | 1181.4 | 133779.5 | 132617.9 | 987.8 |
| 0.67 | 0.0 | 0.0 | 640.000 | 14.00 | 0.10 | -1.30 | Полные | 1124.3 | 127409.1 | 126301.9 | 896.0 |
| 0.63 | 0.0 | 0.0 | 608.000 | 14.00 | 0.10 | -1.30 | Полные | 1067.3 | 121038.6 | 119986.0 | 808.6 |
| 0.60 | 0.0 | 0.0 | 576.000 | 14.00 | 0.09 | -1.30 | Полные | 1010.4 | 114668.2 | 113670.2 | 725.8 |
| 0.57 | 0.0 | 0.0 | 544.000 | 14.00 | 0.09 | -1.30 | Полные | 953.6 | 108297.7 | 107354.6 | 647.4 |
| 0.53 | 0.0 | 0.0 | 512.000 | 14.00 | 0.08 | -1.30 | Полные | 897.0 | 101927.3 | 101039.1 | 573.4 |

Рис. 3. Пример тарифовочной характеристики топливного бака

работкой и перекачкой топлива, целесообразно устанавливать $\delta\mu$ одинаковым для всех топливных емкостей.

7. Программы заправки и выработки топлива ЛА

Массово-инерционные характеристики всего топлива летательного аппарата вычисляются суммированием по всем топливным емкостям, как стационарным, так и по размещенным на ЛА подвесным и вкладным топливным бакам, а в процессе эксплуатации ЛА, при подготовке к полету, в полете и после посадки - объем топлива на борту и центровка. Эти параметры необходимо постоянно отслеживать, чтобы в воздухе центровка не выходила за допустимые ограничения, а на земле не нарушались ограничения по нагрузке на стойки шасси, условия неопрокидывания самолета на хвост и другие эксплуатационные ограничения. Процессы заправки, дозаправки в воздухе, выработки и слива топлива управляются специальными программами, реализованными в устройствах автоматики топливной системы. На Рис. 4 приведен пример программы выработки топлива из

баков. Слева показан график выработки топлива. Этот график в области допустимых центровок отражает характер зависимости X_m от текущей массы топлива, которая отложена здесь по оси ординат. Справа показан порядок послойной выработки топлива из разных баков, соответствующий графику слева.

Такое представление программ изменения состояния топливных баков может быть построено по тем тарифовочным данным, которые насчитаны для каждого бака, по функциям $F(\mu, \theta, \gamma)$, или по таблицам такого типа как на Рис 3. Послойное изменение состояний топливных баков может быть использовано на этапе синтеза управляющих программ. Например, для синтеза программы выработки топлива, можно, начиная с полностью заправленных баков, в интерактивном режиме послойно «вырабатывать» топливо из разных баков, при этом следить за графиком центровки, чтобы он не выходил за ограничения области допустимых центровок. Точки излома графика будут означать моменты переключения для управляющей программы.

Однако для точного анализа программ заправки, выработки, слива топлива таблица

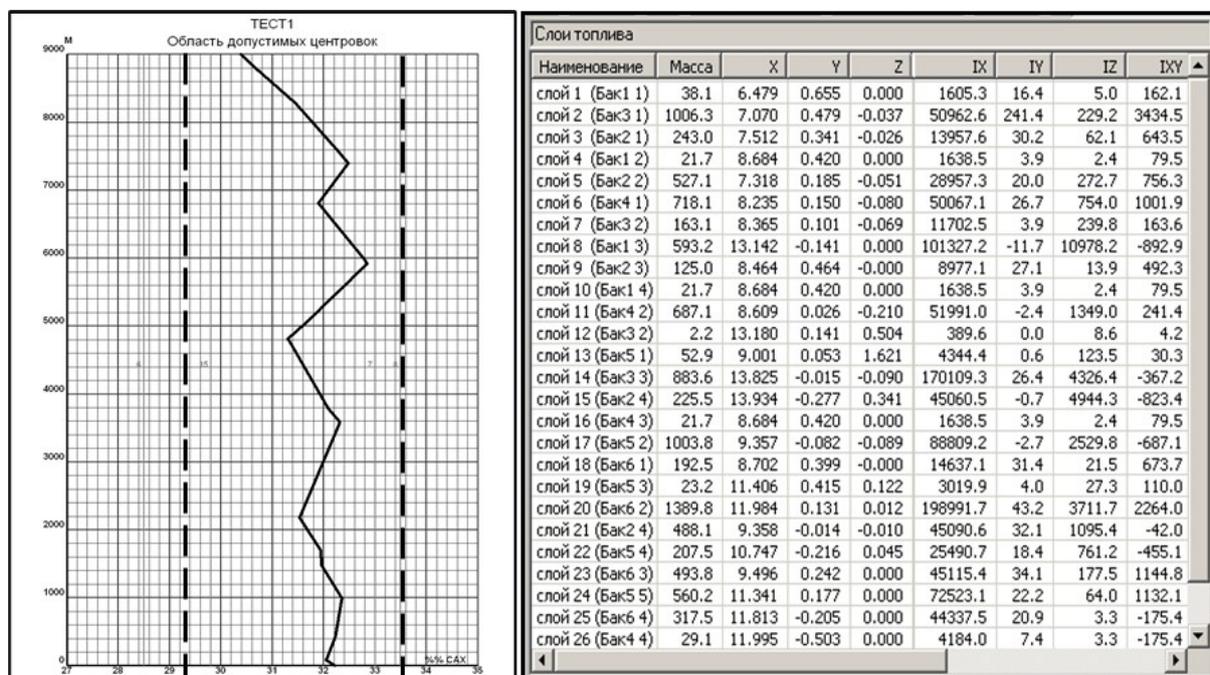


Рис. 4. Программа и график выработки топлива из баков

приведенная на Рис. 3 не совсем корректна. По-слойная выработка не отражает перераспределение топлива между баками в текущих процессах. Перекачка или свободный перелив между баками происходит в любой программе управления топливом. В частности, выработка топлива, т.е. подача его в двигатели, идет только из расходных баков или из расходных отсеков, а в расходный бак топливо поступает по системе трубопроводов из крыльевых, фюзеляжных и других баков. Кроме того, при заправке, дозаправке в воздухе, при выработке и сливе ведется перекачка топлива из левых крыльевых баков в правые и обратно для уравнивания ЛА в поперечном канале управления. Есть и другие процессы перекачки, которые включаются для обеспечения центровки и решения других задач в полете и на земле.

Более точно процессы изменения массы топлива на борту и других его массово-инерционных характеристик могут быть заданы с помощью дискретной последовательности состояний всех топливных баков ЛА в моменты переключения соответствующей программы. Такая последовательность состояний всей совокупности топливных емкостей может быть задана таблицей (Табл. 1).

В столбце m таблицы выводится текущая общая масса топлива, в столбцах m^i – текущая масса топлива в i -том топливном баке (заметьте, что в каждой k -той строке $m_k = m_k^1 + m_k^2 + \dots + m_k^n$), X_m, Y_m, Z_m – текущее положение центра масс всего топлива, а $I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, I_{xy}$ – полные моменты инерции текущего объема топлива на борту ЛА.

Приведенная таблица отражает дискретные моменты изменения состояния топлива в баках, происходящее под управлением вычислителей, которые запускают перекачивающие насосы,

открывают и закрывают клапаны и краны трубопроводов между баками. Вычислители вырабатывают команды в зависимости от сигналов, поступающих от многочисленных датчиков и измерителей. Эти сигналы вырабатываются как функции текущего объема топлива в том или ином баке, а также от текущих значений угла тангажа и крена. Поэтому таблица состояний зависит от эволюций ЛА в полете и на земле.

8. Визуализация в задачах расчета характеристик топлива

Визуализация при решении задач, связанных с расчетом массово-инерционных характеристик топлива, необходима для визуального контроля исходных данных и полученных результатов расчетов. Визуализация должна быть построена на уровне компоновки баков на борту ЛА, на уровне задания геометрии баков, в задачах контроля центровки при изменении текущего объема топлива.

Визуализация компоновки баков полезна на начальных стадиях проектирования, в процессе размещения топливных емкостей. Компоновка топливных баков может быть показана на форме в плане, на фронтальной и боковой проекции. При этом, перемещения и параметризация топливных емкостей могут производиться в интерактивном режиме в наглядной форме.

На этапе рабочего проектирования визуализация топливных баков и топливных отсеков является необходимым инструментом контроля в задачах расчета их характеристик. Поскольку основной расчетной моделью для таких задач являются 3-D объекты, их визуализация требует специальных программных средств. Современные операционные системы, как правило, оснащены средствами визуализации 3-D объек-

Табл. 1. Таблица состояний топливных баков ЛА в моменты переключения

| № п/п | m | m^1 | m^2 | ... | m^n | X_m | Y_m | Z_m | I_{xx} | I_{yy} | I_{zz} | I_{xy} |
|-------|-------|---------|---------|-----|---------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | m_1 | m_1^1 | m_1^2 | ... | m_1^n | X_{m_1} | Y_{m_1} | Z_{m_1} | I_{xx_1} | I_{yy_1} | I_{zz_1} | I_{xy_1} |
| 2 | m_2 | m_2^1 | m_2^2 | ... | m_2^n | X_{m_2} | Y_{m_2} | Z_{m_2} | I_{xx_2} | I_{yy_2} | I_{zz_2} | I_{xy_2} |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| N | m_N | m_N^1 | m_N^2 | ... | m_N^n | X_{m_N} | Y_{m_N} | Z_{m_N} | I_{xx_N} | I_{yy_N} | I_{zz_N} | I_{xy_N} |

тов (C3D Vision, 3ds Max, MashLab). В рамках задач, связанных с расчетами топливных баков, кроме обычных средств визуализации 3-D объектов, с помощью которых можно визуализировать каждый элемент конструкции топливных баков в отдельности, полезно иметь средства типа «рентгеновских снимков» всего бака в сборке вместе с внутренними конструкциями. Это важно для анализа корректности задания внутренних вытесняющих топливо конструкций и контроля того, не выходят ли заданные конструкции за границы бака. Средства визуализации при расчете тарифовочных характеристик, а также при анализе центровки в процессах заправки, выработки и слива топлива должны обеспечивать вывод графиков, диаграмм и другой наглядной информации о результатах выполненных расчетов.

9. Программная реализация модуля расчетов МИХ топлива

Программная реализация вычислительных моделей расчета МИХ топлива ЛА, представленных выше, разработана в отдельном модуле расчета МИХ топлива в составе Автоматизированной Системы Весового Проектирования (АСВП), описанной в [1]. Информационной основой АСВП является весовая модель ЛА, на базе которой построен ряд прикладных модулей, в том числе модуль расчета МИХ топлива. Рассматриваемая в данном проекте структура прикладных модулей построена по клиент-серверной архитектуре, где весовая модель служит единым хранилищем информации, базой данных системы. Непосредственно с информацией, хранящейся в этой базе данных,

взаимодействуют вычислительные, расчетные программы – серверы, которые кроме расчетных функций обеспечивают информационную связь клиентских модулей с весовой моделью ЛА. В модуле расчета МИХ топлива решаются следующие задачи:

- формирование структуры топливных баков ЛА,
- построение триангуляционных моделей топливных баков,
- расчет МИХ топлива в топливном баке и расчет тарифовочных характеристик баков,
- синтез и анализ программ заправки, выработки и слива топлива.

На Рис. 5 приведена структура данных Модуля расчета МИХ топлива.

Проведение массово-инерционных и других расчетов топлива начинается с построения общей структуры топливных емкостей ЛА, размещения и компоновки их на борту, а также формирования геометрии и других параметров топливных баков, необходимых для расчетов. Для этого в модуле расчета МИХ топлива реализованы следующие функции:

- выбор из базы данных АСВП или создание новой записи ЛА,
- выбор из базы данных АСВП или создание новой записи топливной системы ЛА,
- выбор из базы данных АСВП или создание новой записи с информацией о топливном баке,
- создание элементов конструкции и агрегатов систем ЛА, размещенных внутри бака,
- создание каркасных моделей топливных баков,
- триангуляция каркасных моделей топливных баков,



Рис.5. Структура данных модуля расчетов МИХ топлива

- загрузка 3-D моделей топливных баков из внешних файлов в формате *.stl и *.obj,
- загрузка 3-D моделей конструкций, размещенных внутри бака,
- сборка полных 3-D моделей топливных баков из отсеков и конструкций, вытесняющих топливо, путем выполнения операций над 3-Добъектами,
- визуализация топливных баков и вытесняющих топливо конструкций.

Этот набор функций позволяет подготовить исходную информацию для проведения любых расчетов характеристик топлива, запомнить эту информацию в базе данных и при необходимости модифицировать ее.

Основной задачей разработанного модуля является расчет массово-инерционных характеристик топлива. Модуль расчета обеспечивает выполнение перечисленных ниже функций:

- расчет располагаемых объемов в топливных баках, в отсеках баков, в группах баков, во внутренних топливных емкостях ЛА, всех объемов с учетом подвесных и вкладных баков;
- расчет МИХ топлива в топливных баках, в отсеках баков, в группах баков, во внутренних топливных емкостях ЛА, всего топлива с учетом подвесных баков, с учетом вкладных баков;
- расчет объемов вытесняющих топливо элементов конструкций и элементов топливной системы, размещенных внутри баков;
- расчет коэффициентов полезного объема топливных баков, групп баков, всех топливных емкостей ЛА;
- расчет тарифовочных характеристик топливных емкостей с заданным шагом по уровню топлива, по массе топлива, для разных углов тангажа, крена, перегрузки, с учетом прогиба и крутки крыла;
- расчет МИХ топлива для шкалы показателей топливомеров (точек на поверхности зеркала топлива) или для другой совокупности точек для разных углов тангажа, крена, перегрузки, с учетом прогиба и крутки крыла;
- оценка по 3-D модели остатка невыработываемого и несливаемого топлива топливных баков;
- расчет OLAP – кубов для функций $\Phi(\eta, \theta, \gamma)$ и $F(\mu, \theta, \gamma)$;

- построение различных проекций и срезов, рассчитанных OLAP – кубов для функций $\Phi(\eta, \theta, \gamma)$ и $F(\mu, \theta, \gamma)$;
- ведение реестра заданий, проводимых расчетов тарифовочных характеристик;
- расчет МИХ топлива, попавшего в заданный объем отсека, ограниченного набором плоскостей в зависимости от текущей массы топлива на борту (в рамках задачи построения распределенных нагрузок);
- визуализация тарифовочных характеристик топливных баков;
- визуализация послойного представления топлива в баках с выделением зеркала текущего остатка топлива.

Данные, полученные в результате расчетов МИХ топливных емкостей и тарифовочных характеристик, предназначены для синтеза и анализа программ заправки, выработки и слива топлива, а также подготовки данных для выполнения расчетов допустимых вариантов полезной загрузки ЛА, включающей заправку и расходование топлива, а также различные варианты целевой нагрузки. Для этого в модуле реализованы следующие функции:

- ведение реестра различных программ заправки, дозаправки в воздухе и на стоянке, выработки топлива в процессе выполнения полетных заданий, аварийного и стояночного слива топлива в зависимости от конфигурации топливной системы, наличия подвесных и вкладных топливных баков;
- интерактивный пошаговый синтез программ заправки, выработки, аварийного или стояночного слива топлива по тарифовочным характеристикам топливных баков с визуальным или программным контролем центровки ЛА в заданных границах;
- построение и сохранение для программы заправки, выработки или слива топлива графиков зависимости центровки от текущего остатка топлива;
- построение и сохранение для программы выработки топлива таблиц послойной (пошаговой) выработки топлива;
- ввод и сохранение для программ заправки, выработки или слива топлива таблиц переключений и состояний топливных баков;

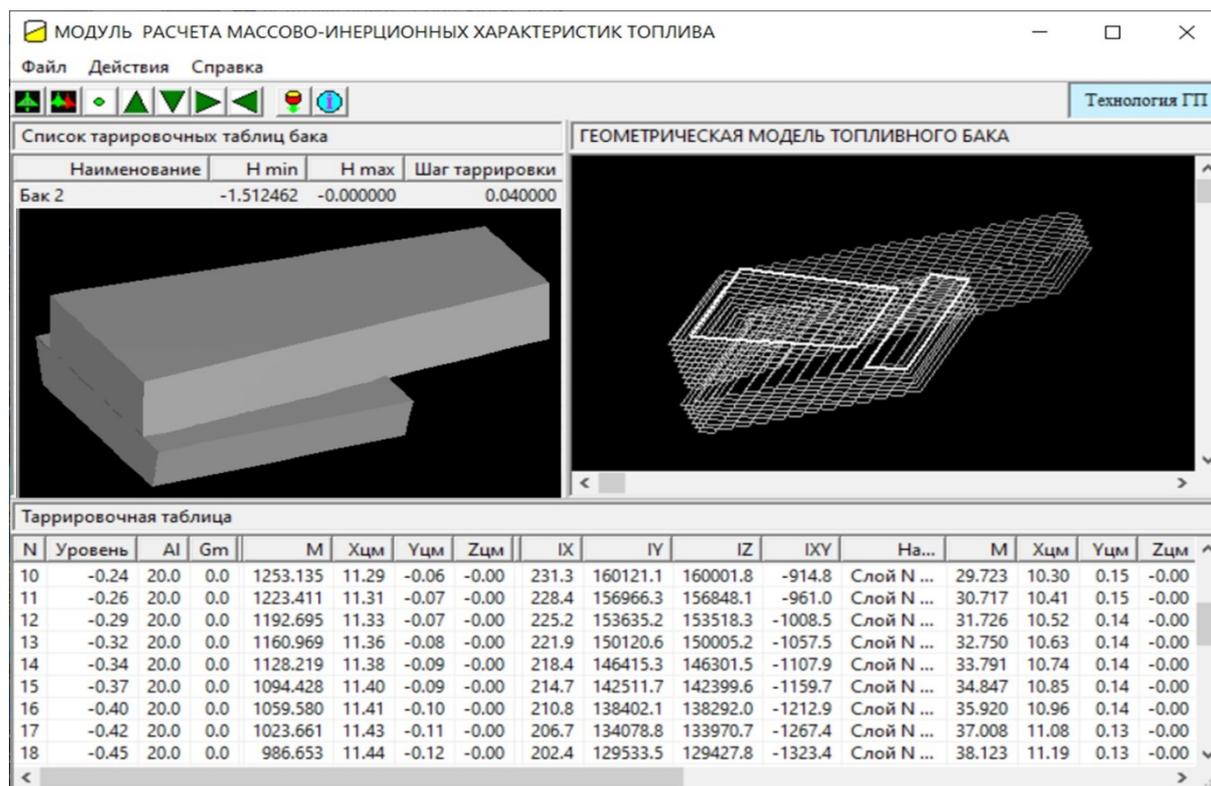


Рис. 6. Пример экранной формы модуля расчета МИХ топлива

- визуализация процессов синтеза и анализа программ заправки, выработки и слива топлива.

На Рис. 6 представлен скриншот экранной формы модуля расчета МИХ топлива, на которой приведен пример расчета тарифовочной характеристики топливного бака, состоящего из двух сообщающихся отсеков. Слева в верхней части экрана показана 3-D модель топливного бака, состоящего из двух сообщающихся отсеков, а справа - разбиение топлива в этом баке на тонкие слои. Выделенный более яркий слой — это зеркало поверхности текущего остатка топлива в двух отсеках. Ниже выведена таблица тарифовочной характеристики с вычисленными МИХ по слоям по общему текущему объему топлива в баке.

Заключение

В настоящей работе были затронуты наиболее существенные задачи, весового проектирования, связанные с выполнением расчетов массово-инерционных характеристик топлива,

размещаемого на борту летательных аппаратов. Эти задачи возникают не только в авиации, но и в ракетостроении, а также в судостроении. Сложность этих задач состоит в том, что в процессе функционирования изделий, несущих на своем борту определенный запас расходуемого топлива, его объем постоянно изменяется, а вместе с этим меняется масса изделия, положение его центра тяжести и другие инерционные характеристики, которые в свою очередь влияют на его динамику, устойчивость и управляемость. В статье рассмотрены основные структуры данных, необходимые при расчетах, кратко изложены методы расчетов, а также представлена программная реализация этих моделей и методов. Разработанный авторами программный модуль реализован в составе Автоматизированной Системы Весового Проектирования Летательных Аппаратов. Данная система создана с использованием инструментальной системы «Генератор Проектов», разработанной в Вычислительном центре Российской академии наук [2].

Литература

1. Л.Л. Вышинский, Ю.А. Флёров, Н.И. Широков. Автоматизированная система весового проектирования самолетов. // Информатика и ее применение. 2018. Т.12. Вып. 1. С. 18-30.
2. Л.Л. Вышинский, И.Л. Гринев, Ю.А. Флеров, А.Н. Широков, Н.И. Широков. Генератор проектов – инструментальный комплекс для разработки «клиент - серверных» систем // Информационные технологии и вычислительные системы. 2003, № 1-2. С. 6-25.

Вышинский Леонид Леонидович. Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», кандидат физико-математических наук ведущий научный сотрудник ВЦ им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН. Количество печатных работ: 72. Область научных интересов: прикладная математика, информатика, автоматизация проектирования. E-mail: vyshinsky@mail.ru.

Флеров Юрий Арсениевич. Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», чл.-корр. РАН, доктор физико-математических наук, профессор, зам. директора ВЦ им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН. Количество печатных работ: 169. Область научных интересов: прикладная математика, информатика, автоматизация проектирования, дискретная математика. E-mail: fler@ccas.ru

Computational Models in Aircraft Fuel System Design Problems

L. L. Vyshinsky, Yu. A. Flerov

Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The article is devoted to the automation of aircraft weight design tasks related to the calculation tasks of mass-inertial characteristics of fuel placed on board aircraft. The main computational models used in these calculations are described, the software implementation of the fuel characteristics calculation module as part of the Automated Weight Design System (ASWP) of aircraft is presented.

Keywords: computational models, computer aided design, weight design, fuel system. project generator, client-server architecture.

DOI 10.14357/20718632220208

References

1. L.L. Vyshinsky, Yu.A. Flerov, N.I. Shirokov. Automated aircraft weight design system. // Informatics and applications. 2018. Vol.12. Issue 1. pp. 18-30.
2. L.L. Vyshinsky, I.L. Grinev, Yu.A. Flerov, A.N. Shirokov, N.I. Shirokov. Project generator - a tool complex for the development of "client - server" systems // Information technologies and computing systems. 2003, No. 1-2. pp. 6-25.

Vyshinsky L. L. Candidate of Sciences (PhD) in physics and mathematics, Leading Researcher, Federal Research Center «Informatics and Control», RAS, Moscow, Russia.

Flerov Y. A. Corresponding Member of the RAS, Doctor of Science in physics and mathematics, Professor, Chief Scientific Officer, Federal Research Center «Informatics and Control», RAS, Moscow, Russia.