

[3, 4], а именно:

- возможность оценить защищенность машины при обстреле в городе или местности с большими перепадами высот;
- возможность оценить защищенность машины при обстреле пушками и пулеметами авиации.

В статье представлен математический аппарат, который использовался для построения поверхности, и возможности анализа.

1. Постановка задачи. Для построения 3D поверхности границы зоны поражения и возможности её анализа необходимо учесть, что геометрия данной поверхности зависит от текущих мгновенных значений тангажа, крена корпуса и параметров движения машины. Необходимо разработать математический аппарат 3D-моделирования границы поражения для проведения расчетов и анализа по различным критериям, а также визуализировать 3D поверхности.

2. Математическая модель, учитывающая ориентацию машины. В методике использовались следующие элементы: точки, вектора, пространственные кривые и поверхности, а также использовалось такое понятие как система координат (СК), которая определяется положением начальной точки и ориентацией осей. В методике использовались два типа систем координат: сферическая и декартова, переход между которыми при необходимости осуществлялся при помощи известных формул математического анализа. Вектор нормали бронелиста, вектор прилета пули, вектор нормали к поверхности на местности или трехмерной модели местности [5] задавались в сферической СК с помощью двух углов: угла с осью Z и угла между проекцией вектора на плоскость XOY ; вектор нормали бронелиста задавался в СК, связанной с машиной (рис. 1).

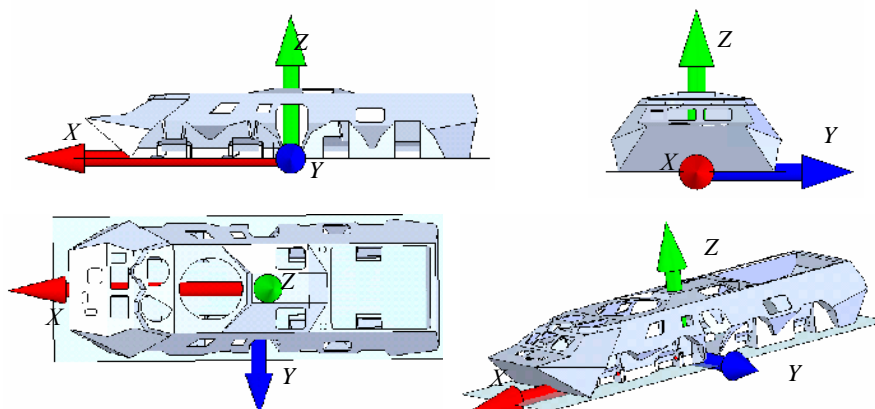


Рис. 1. Ориентация системы координат машины

Система координат ориентации машины и её положение задавалось с помощью трех углов и двух координат X и Y .

Координаты, определяющие положение машины – это долгота и широта на карте, а углы, определяющие ориентацию машины – это углы, задающие нормаль к местности на карте в точке положения Y и угол θ , который определяет направление движения машины (рис. 2).

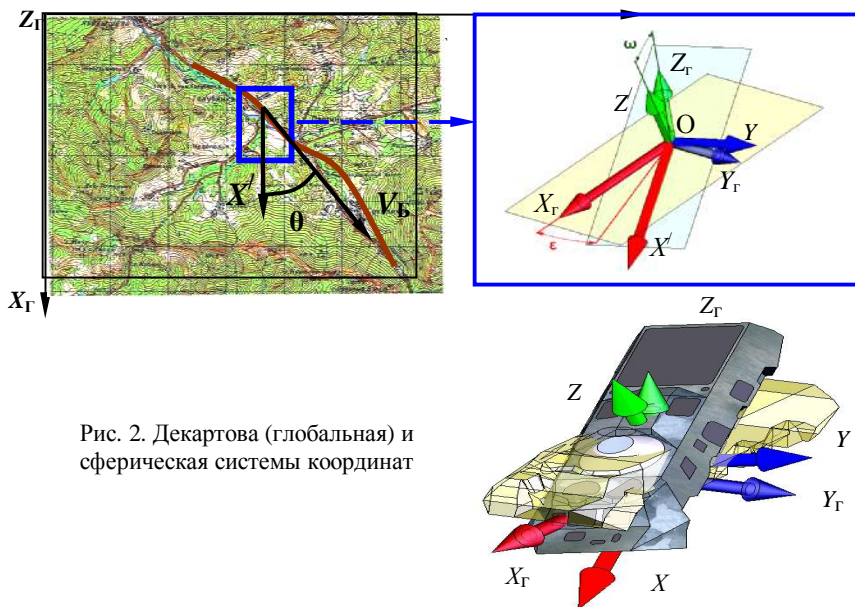


Рис. 2. Декартова (глобальная) и сферическая системы координат

Переход между различными системами координат может осуществляться с помощью трех матриц поворота и одной матрицы трансляции. Матрицы поворота на угол ψ относительно осей X , Y и Z представлены ниже:

- относительно оси X

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}; \quad (1)$$

- относительно оси Y

$$Y = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix}; \quad (2)$$

• относительно оси Z

$$Z = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Результирующая матрица поворота будет получена путём матричного умножения соответствующих матриц. При трансляции объекта на величины a , b и c в направлениях X , Y и Z соответственно по отношению к начальному положению, в котором локальная система координат совпадала с глобальной, глобальные координаты точек объекта в новом положении (X, Y, Z) вычисляются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Дальнейшие операции по определению параметров встречи по полету пули и прочее определялись в глобальной системе координат (ГСК).

3. Определение координат вектора скорости снаряда. При построении трехмерных тактических диаграмм учитывалась не только ориентация машины на местности, но и скорость ее движения, т.к. она может существенно повлиять на конечный вид диаграммы. Направление движения машины также играет важную роль, так как для одной и той же нормали на карте можно построить бесконечное количество направлений движения машины. Соответственно конечные трехмерные тактические диаграммы могут очень сильно отличаться (рис. 3, 4).

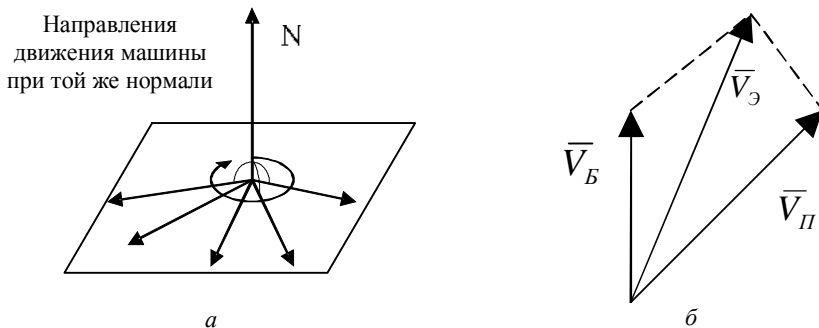


Рис. 3. Схема распределения направления движения машины (а) и векторов скорости машины и снаряда (б): (\vec{V}_P – скорость снаряда, \vec{V}_B – скорость машины, \vec{V}_3 – эквивалентная скорость)

Как было сказано выше, параметры встречи снаряда с бронеплитой (угол и скорость встречи) для фиксированной произвольной ориентации бронелиста, когда координаты вектора N_3 зафиксированы, и фиксированных произвольных характеристик снаряда в момент встречи с бронеплитой, в ГСК (зафиксировано направление вектора скорости снаряда) могут существенно меняться в зависимости от величины скорости движения машины. Отсюда, учет скорости движения машины предлагается осуществлять путем векторного сложения векторов скорости машины и снаряда (см. рис. 4):

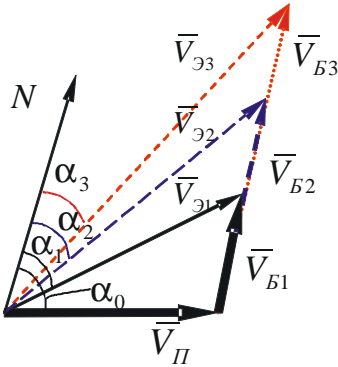


Рис. 4. Схема распределения скоростей и определения угла α

где \vec{V}_3 – эквивалентный вектор скорости снаряда в момент встречи с листом преграды; $\vec{V}_Б$ – вектор скорости машины; $\vec{V}_П$ – вектор скорости снаряда в момент встречи с преградой (определяется с помощью расчетов)

$$\vec{V}_3 = \vec{V}_П + \vec{V}_Б \Rightarrow \begin{cases} V_{x3} = V_{xП} + V_{xB}; \\ V_{y3} = V_{yП} + V_{yB}; \\ V_{z3} = V_{zП} + V_{zB}, \end{cases} \quad (5)$$

где \vec{V}_3 – эквивалентный вектор скорости снаряда в момент встречи с листом преграды; $\vec{V}_Б$ – вектор скорости машины; $\vec{V}_П$ – вектор скорости снаряда в момент встречи с преградой (определяется с помощью расчетов)

$$\vec{V}_П = V_П (\cos \delta_3 \sin \varphi_3, \sin \delta_3 \sin \varphi_3, \cos \varphi_3),$$

где $V_П$ – численное значение скорости

Методика расчета процесса полета снаряда приведена в статье [6].

4. Определение угла встречи с преградой. Общая картина ориентации векторов в пространстве после поворота осей примет вид, указанный на рис. 5.

Для определенных в глобальной системе координат параметров бронелиста и скорости полета снаряда с учетом вышеописанных факторов для нахождения угла встречи предлагается использовать следующие соотношения:

$$\cos(V_3, N_3) = \frac{V_{x3} * N_{x3} + V_{y3} * N_{y3} + V_{z3} * N_{z3}}{|\vec{V}_3| * |\vec{N}_3|}, \quad (6)$$

тогда

$$\alpha = \arccos \frac{V_{XЭ} * N_{XЭ} + V_{YЭ} * N_{YЭ} + V_{ZЭ} * N_{ZЭ}}{|V_{Э}| * |N_{Э}|} . \quad (7)$$

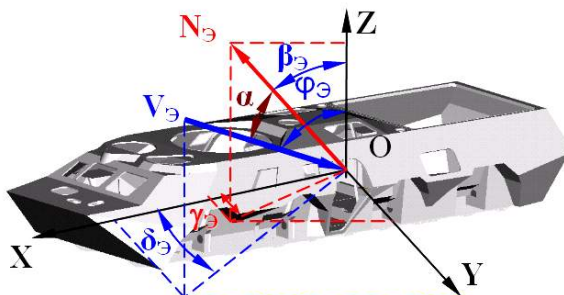


Рис. 5. Определение угла встречи α снаряда с броней ($\delta_{Э}$ – угол обстрела после поворота осей; $\Phi_{Э}$ – угол падения снаряда после поворота осей; $\beta_{Э}$ – угол наклона брони; $\gamma_{Э}$ – угол подворота брони; α – угол встречи с броней)

5. Определение координат точки выстрела, соответствующих исходному углу и скорости прилета снаряда. Для определения координат точки выстрела используется метод, описанный в [6]. Отличием является применение «обратного» расчета траектории полета снаряда (рис. 6).

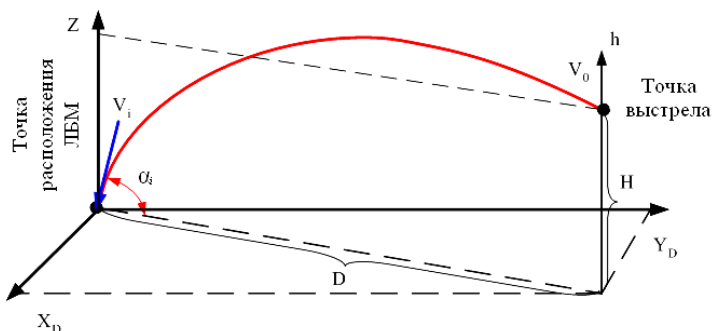


Рис.6. Зависимость высоты полета от дальности

6. Определение совокупности точек, принадлежащих границе области между опасной и безопасной зонами. Для построения поверхности тактической диаграммы необходимо найти ряд точек, которые лежат на этой

поверхности. Количество точек зависит от той точности, которая необходима для построения трехмерной тактической диаграммы.

Алгоритм построения:

1. Внешний цикл по $i = 1$ до N , где N – количество точек маршрута, для которых строятся диаграммы. Каждая точка маршрута привязывается к конкретной траектории на указанной местности (определяется пользователем). На каждой итерации определяются уникальные значения координат $X, Y, Z, \omega, \varepsilon, V_B$.

2. Вложенный цикл по $j = 1$ до M , где M – количество бронелистов (задается пользователем) с собственными характеристиками: β – угол наклона брони, γ – угол поворота брони и h – толщина брони. Для каждой итерации цикла по j определяются уникальные значения $\omega, \varepsilon, \beta_j, \gamma_j$.

3. Вложенный в 2 цикл по углу обстрела δ .

4. Вложенный в 3 цикл по углу падения снаряда φ .

5. Вложенный в 4 цикл по $0 \leq V_{\Pi} \leq V_{\Pi}$, где V_{Π} – начальная скорость снаряда (вводится пользователем). На каждой итерации определяются уникальные значения

$$\vec{V}_3 = \vec{V}_B + \vec{V}_{\Pi} \text{ и } \alpha = \vec{V}_3 \wedge \vec{N}_3$$

(см. рис. 5) и рассчитывается точка пересечения с кривой пробиваемости (рис 7).

После этого можно точно определить V_{Π} , φ_3 , δ_3 и через них D – дальность выстрела и H – высоту, относительно точки X, Y, Z , т.е. машины. Величины D, H определяются с помощью обратного расчета траектории полета снаряда.

7. Построение и пересечение В-сплайн поверхностей. По имеющимся точкам создаются В-сплайн кривые и В-сплайн поверхности [7]. Математический аппарат, позволяющий получить математическое описание кривых, проходящих через заданные точки, и поверхности, проходящие через заданные кривые, приведен ниже.

Далее полученные математические уравнения поверхностей и кривых используются для дальнейшей обработки, к примеру, для получения кривых пересечения поверхностей, что необходимо для определения на карте опасных зон и для разработки дальнейшей методики анализа трехмерных поверхностей тактической диаграммы.

Построение В-сплайн кривой. По рассчитанным точкам, используя

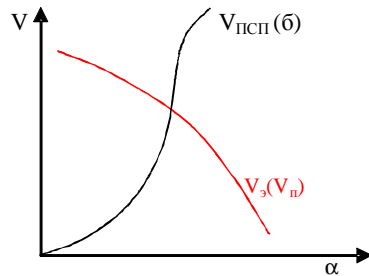


Рис. 7. Определение точки пересечения с кривой пробиваемости

метод [7] вычисления В-сплайн кривой получаем поле кривых.

В-сплайн в общем виде записывается следующим образом:

$$P(u) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u), \quad (t_{h-1} \leq u \leq t_{h+1}), \quad (8)$$

где

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u-t_i)N_{i,k-1}(u)}{t_{i+k-1}-t_i} + \frac{(t_{i+k}-u)N_{i+1,k-1}(u)}{t_{i+k}-t_{i+1}}; \quad (9)$$

$$N_{i,l}(u) = \begin{cases} 1 & t_i \leq u \leq t_{i+1}; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (10)$$

Значения t_i называются узловыми, они ограничивают отрезки значений параметра, внутри которых функции сопряжения имеют ненулевые значения. В приведенной формуле неопределенность $\frac{0}{0}$ считается равной нулю.

Для нахождения В-сплайна, проходящего через точки Q_0, Q_1, \dots, Q_n , необходимо определить узлы, через которые будет проходить В-сплайн. Для этого воспользуемся следующим алгоритмом:

$$t_i = 0 \quad (i = 0, 1, \dots, k-1); \quad (11)$$

$$t_i = t_{i-1} + \frac{\sum_{j=i-2}^{i-2} d_j}{\sum_{m=k}^{n+1} \sum_{j=m-k}^{m-2} d_j} \quad (i = k, k+1, \dots, n); \quad (12)$$

$$t_i = 1 \quad (i = n+1, n+2, \dots, n+k); \quad (13)$$

где

$$d_j = \sqrt{|Q_{j+1} - Q_j|}. \quad (14)$$

Здесь необходимо определить положение $n+1$ задающих точек P_0, P_1, \dots, P_n . Эти точки должны удовлетворять следующему соотношению

$$Q_j = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u_j) \quad (j = 0, 1, \dots, n), \quad (15)$$

где u_j – значения параметров, которые должны соответствовать точкам Q_j .

Для получения гладкой кривой их выбирают следующим образом:

$$u_j = \frac{t_{j+1} + t_{j+2} + \dots + t_{j+k-1}}{k-1} \quad (j = 0, 1, \dots, n). \quad (16)$$

Далее эти значения подставляются в формулу (15), в результате чего получается система уравнений для определения P_j

$$\begin{bmatrix} \cdot & N_{i,k}(u_0) & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & N_{i,k}(u_1) & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & N_{i,k}(u_n) & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ \cdot \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ \cdot \\ Q_n \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Построение В-сплайн поверхностей. Уравнение В-сплайновой поверхности в общем виде записывается следующим образом [7]:

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v), \quad (18)$$

$$(s_{k-1} \leq u \leq s_{n+1}, t_{l-1} \leq v \leq t_{m+1}), \quad (19)$$

где P_{ij} – значение функции в узлах, а $N_{i,k}(u)$ и $N_{j,l}(v)$ – функции форм, имеющие аналогичный вид формул (9), (10).

В-сплайн поверхности строятся по полю полученных ранее кривых.

Пересечение поверхностей. При нахождении пересечений поверхностей используем следующий алгоритм:

- пересекающиеся поверхности делятся на множество четырехугольных лоскутов с малой кривизной;
- выбираются лоскуты, близкие к линии пересечения;
- выбирается одна пересекающаяся пара, которая даст первый сегмент кривой пересечения;
- один из концов этого сегмента берется в качестве начальной точки;
- производится поиск следующей точки пересечения;
- ищется новая пара четырехугольников, которая даст соседний сегмент кривой пересечения, одним из концов которого будет начальная точка поиска;
- пересечение новой пары четырехугольников даст две точки, одна из которых берется в качестве нового конца кривой;
- начинается поиск следующей пары четырехугольников;
- поверхности, которые исследуются на пересечение, разбиваются на

множество лоскутов с малым изменением кривизны внутри лоскута;

- далее определяется группа пересекающихся лоскутов;
- процедура поиска продолжается до тех пор, пока не будет достигнута одна из границ поверхности;
- в дальнейшем поиск начинается с другого конца первого сегмента.

Точные координаты точек пересечения получаются решением уравнения

$$P(u, v) - Q(s, t) = 0 \quad (20)$$

с использованием концов сегментов в качестве начального приближения. Эта процедура повторяется со всеми начальными сегментами до тех пор, пока не будут найдены все кривые [7].

Выводы. Описанная математическая модель обеспечивает возможность нахождения опасных и безопасных зон при обстреле произвольным фиксированным типом боеприпаса для произвольного фиксированного положения и параметров движения ЛБМ.

Описан метод определения границ между опасной и безопасной зонами.

Представлен общий вид математического описания В-сплайновых поверхностей, которые определяют, границы зоны поражения и плана трехмерной местности. Это позволяет строить трехмерные диаграммы и 3D-планы и проводить их разносторонний анализ.

Создана математическая модель, которая позволяет решать задачи:

- оценки безопасной зоны для ЛБМ в реальном времени, которую можно использовать в тактических компьютеризированных системах нового поколения, как для единичной машины, так и группы машин разного вида;
- связанные с выбором правильной огневой позиции стрелком при борьбе с ЛБМ с помощью стрелкового оружия, что повлечет рост эффективности его применения.

Список литературы: 1. *Крыжный А.В., Зиркевич В.М.* Особенности применения боевых машин легкой категории веса в современных вооруженных конфликтах // Наука и оборона. – 2005. – №3 – С.45-47. 2. *Кошкаргов Ю.Ю.* Досвід застосування танкових підрозділів (частин) у локальних конфліктах сучасності та їх вплив на розвиток тактики // Механіка та машинобудування. – 2001. – №1,2. – С.293-300. 3. *Чобиток В.А., Брижинёв Ю.Н., Долганов А.А., Мирошник А.В.* Конструкция и расчёт танков и БМП. – М.: Воениздат, 1984. – 376 с. 4. *Буров С.С.* Конструкция и расчёт танков. – М.: Изд-во Академии им. Малиновского Р.Я., 1973. – 602 с. 5. *Шаталов О.Е.* К вопросу построения и использования 3D-мерных планов местности // Механіка та машинобудування. – 2005. – №1. – С.210-214. 6. *Ткачук А.Н., Шаталов О.Е., Ларин А.Ю., Васильев А.Ю., Мартиненко А.В.* Расчет траектории полета пуль и снарядов с учетом угла нутации, прецессии и собственного вращения // Артиллерийское Стрелковое Вооружение. Международный ежеквартальный журнал. – №3. – «16 2005». – С.38-42. 7. *Кунув Ли.* Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560с.

УДК 539.3

А.Д. ЧЕПУРНОЙ, докт. техн. наук, **Г.П. ГЛИНИН**, **Ю.Б. ГУСЕВ**,
М.М. ПЕКЛИЧ, **Е.Н. БАРЧАН**, Головной специализированный
конструкторско-технологический институт, г. Мариуполь,
Н.А. ТКАЧУК, докт. техн. наук, НТУ “ХПИ”

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В статті запропоновано єдиний метод аналізу та синтезу елементів складних механічних систем на основі взаємопов'язаних етапів розрахунку напружено-деформованого стану та експериментальних досліджень. Розглядаючи процес проектування з точки зору системного підходу, вдається встановити міру відповідності числових та експериментальних результатів, а також ідентифікувати параметри розрахункової моделі досліджуваного елемента.

The united method of analysis and synthesis of elements of the complicated mechanical systems is offered in the paper on the basis of interrelated stages of computation of stressed-deformed state and experimental researches. Examining a planning process from the viewpoint of system approach, it is succeeded to set a measure of accordance of numerical and experimental results, and also to identify the parameters of computational model of explored element.

Актуальность задачи. В процессе автоматизированного проектирования сложных машиностроительных конструкций возникают задачи обеспечения достоверности расчетных схем, применяемых для исследования их напряженно-деформированного состояния с привлечением таких современных методов как метод конечных элементов (МКЭ) [1, 2]. Применение расчетных схем в МКЭ требует в качестве исходных данных значения параметров конечно-элементной разбивки исследуемых объектов, граничных условий и нагрузок. Точность исходных данных обеспечивает высокую точность численных результатов. В последующем при использовании данных моделей в специализированных интегрированных системах автоматизированного анализа и синтеза элементов сложных механических систем обеспечивается и точность исследований, и высокие прочностные и жесткостные характеристики проектируемых изделий. В конечном итоге обеспечиваются высокие технические характеристики и конкурентоспособность выпускаемой продукции.

Существующие в настоящее время численные методы исследования напряженно-деформированного состояния, среди которых лидирующее положение занимает МКЭ, не обеспечивают только за счет внутренних средств контроль точности результатов моделирования по сравнению с поведением реальных объектов. Актуальной становится задача обеспечения

достоверности используемых расчетных схем при численном исследовании сложных машиностроительных систем. В статье на основе некоторых подходов, описанных в [3-5], предлагается расчетно-экспериментальный метод (РЭМ) исследований, при использовании которого в качестве основно-