

менять методы Рунге-Куты, Адамса-Штермера, Крылова и др. В нашей работе использовали методы Рунге-Куты с итерациями на каждом шаге и метод Крылова (МКЭ). Для выбора шага расчета при использовании данных методов были оценены результаты, полученные при различных величинах шага.

Полученные системы уравнений – это системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, интегрирование которых (согласно [3]) целесообразно проводить неявным методом Крылова (МКЭ). При этом отпадают ограничения по длине участков и шагу вычислений в пространстве и времени.

Из приведенных уравнений баланса энергии для газа и стенок следует, что величина температуры газа в выходном сечении зависит от количества тепла, внесенного с газом через входное сечение, от тепла, отведенного теплопроводностью через стенку трубы, от тепла, унесенного с газом через выходное сечение.

На рисунке 3 показано расчетное и экспериментальное значение температуры ОГ перед и за нейтрализатором. Результаты, представленные на рисунках, наглядно демонстрируют, как влияет электрический подогреватель на температуру ОГ и на эффективность разогрева нейтрализатора.

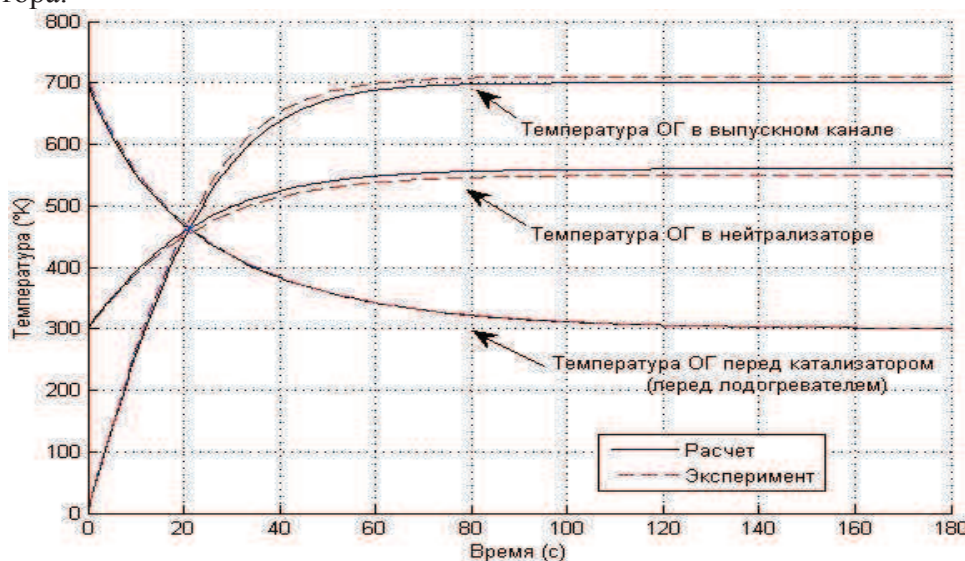


Рисунок 3. Сравнение расчетного и экспериментального распределения температур в выпускном тракте (стандартный угол опережения зажигания, нагрузка = 0)

Литература

1. Кавтарадзе Р.З., Петриченко М.Р. Эволюция учения о теплообмене в дизелях от Нуссельта до наших дней. Двигателестроение, 1993. № 1-2. с. 33-35
2. Костров А. В. Применение теории подобия для оценки конвективного теплообмена в карбюраторных двиг-х. Журнал Автомобильная промышленность, 1972, с. 11-12.
3. Крылов О. В. Метод конечных элементов/ М. Радио и связь, 2002, 104 с.
4. <http://dic.academic.ru/> 2010.

Автоматизированное проектирование лопаток турбин с параболическими обводами

к.т.н. доц. Виноградов Л.В., к.т.н. доц. Костюков А.В.
 Университет машиностроения
 89150166953

Аннотация. В работе рассмотрен вопрос профилирования лопатки турбины. Для автоматизированного проектирования в среде *Mathcad* для ЭВМ разработана прикладная программа, являющаяся элементом *CAD* системы. Профиль лопаток очерчивается тремя параболой: спинка профиля – одной параболой, а корытце –

двумя параболой с заданием максимальной толщины профиля. Программа протестирована на более чем 30 профилях газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: турбина, решетка, пакет прикладных программ, проектирование

Этап профилирования лопаток турбин является одним из наиболее трудоемких и многовариантных в процессе конструирования и создания газотурбинных двигателей (ГТД). При определенных условиях этот этап требует экспериментальной проверки и доработки на газодинамических стендах. На практике применяются два основных способа профилирования ступени турбины: первый способ – применение ранее разработанных профилей, обычно представляемых в атласах профилей или в нормативных документах, второй способ – разработка оригинального профиля.

Известно, что профиль лопатки описывается различными кривыми: параболой, совокупностью сопряженных окружностей, лемнискатами, эллиптическими кривыми, дробной рациональной функцией и т.д. Несмотря на такое разнообразие, основные принципы проектирования с использованием указанных кривых в своей основе едины.

На практике разработки ГТД применяется достаточно большое разнообразие конструктивных схем проточной части, что отражается в соответствующих расчетных схемах, на базе которых разрабатываются математические модели (ММ) объектов проектирования, а затем программы и пакеты прикладных программ (ППП) для ЭВМ.

В работе [1] рассмотрена расчетная схема при построении профиля лопатки турбины, предложенная в работе [2]. В соответствии с этой схемой передний фронт решетки профилей совмещен с осью ординат. Поток набегаёт слева, установочная (базовая) линия, положение которой определяется углом установки профиля в решетке, проходит через центры окружностей входной и выходной кромок профиля. Окружность входной кромки касается переднего фронта решетки, окружность выходной кромки профиля касается заднего фронта решетки профилей. Направление окружной скорости совпадает с положительным направлением оси ординат. В работе [1] также дан пакет прикладных программ для ЭВМ на языке *Mathcad*, реализующий автоматизированное проектирование лопаток турбин.

Известно, что в системе анализа конструкций *CAD* (computer-aided design) систем желательно, чтобы были представлены программы, ППП для всех возможных вариантов расчетных схем объектов проектирования данной области.

В работе [3] предложен вариант расчетной схемы для построения профиля лопатки турбины (рисунок 1). Для реализации этой расчетной схемы в математической модели положено: передний фронт решетки совмещен с осью ординат, поток набегаёт слева, установочная (базовая) линия, положение которой определяется углом установки профиля в решетке, касается окружностей входной и выходной кромок профиля, окружность передней кромки касается переднего фронта решетки, а окружность выходной кромки касается заднего фронта решетки, направление окружной скорости совпадает с противоположным направлением оси ординат.

На рисунке 1 показаны некоторые параметры, которые используются при построении профиля лопатки турбин: $\beta_{1л}$ – входной угол профиля лопатки, образованный касательной к средней линии *OK* профиля в его входной части и передним фронтом решетки; $\beta_{2л}$ – выходной угол профиля лопатки, образованный касательной к средней линии профиля *nm* в его выходной части и задним фронтом решетки (для соплового аппарата указанные углы обозначаются через α); *S* – ширина решетки; *a* – горло межлопаточного канала (минимальное расстояние между двумя соседними лопатками); $\delta_{л}$ – угол отгиба (затылочный угол); r_1 и r_2 – радиусы входной и выходной кромок профиля; *t* – шаг решетки; φ_1 – угол заострения входной кромки; φ_2 – угол заострения выходной кромки; X_C – расстояние, на котором расположено сечение максимальной толщины профиля C_{max} .

В работе [3] дана последовательность основных этапов профилирования, практические рекомендации для исходных параметров или в виде численных интервалов, или в виде опытных формул для транспортных ГТД.

Для решения задачи построения профиля лопатки турбины в соответствии с расчетной схемой (рисунок 1) были разработаны две новые программы для ЭВМ в среде *Mathcad*: *Subroutine to calculate the angle of the profile in the Turbomachines cascade* (Подпрограмма расчета угла установки профиля в турбинной решетке); *The program for the automated profiling the Turbomachines cascade*. Вновь разработанные программные модули были встроены в *CAD* систему проектирования турбомашин, разработка которой на кафедре ведется давно и которая постоянно расширяется и модернизируется, чему во многом способствует модульный принцип построения *CAD* системы.

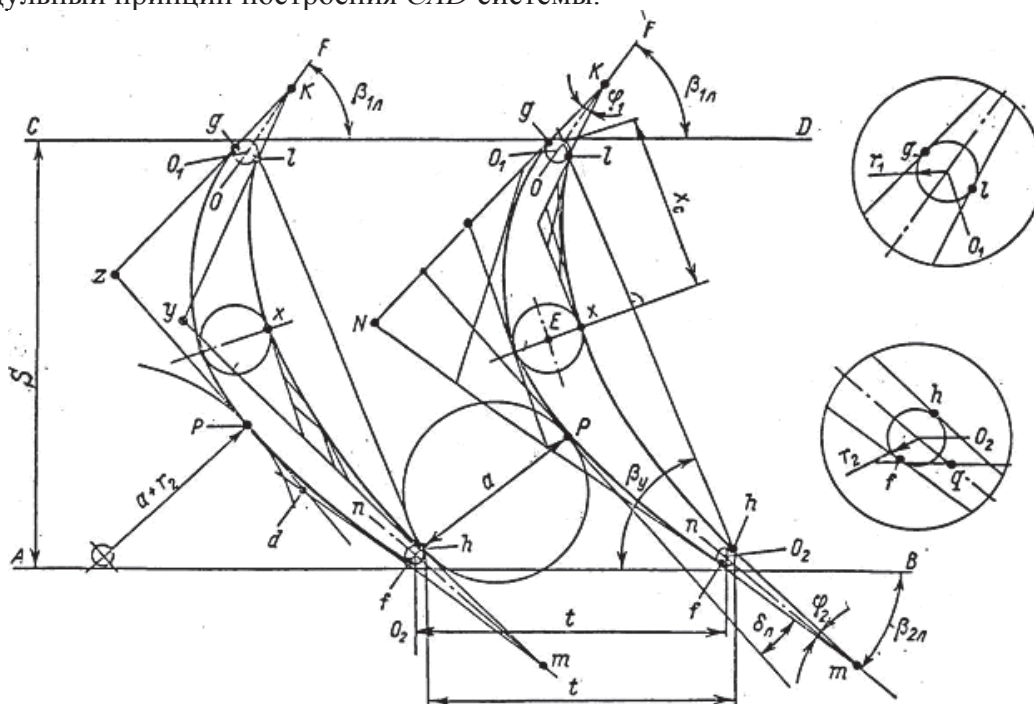


Рисунок 1. Расчетная схема построения профиля турбинной решетки по дугам параболы [3]

При проектировании профилей с различными исходными параметрами была использована подпрограмма построения параболы как огибающей сетки касательных, свойства которой (параболы) даны в работе [4], а текст самой подпрограммы "*Pp_PARMED RADIALCASCADE.xmcd*", в частности, приведен также в [1].

Разработанный пакет позволяет вести построение профиля в виде двух парабол и в виде трех парабол.

Представление контура лопатки в виде двух парабол это тот случай, когда в контрольный треугольник gzf вписывается парабола спинки (рисунок 1), а в контрольный треугольник lyh - парабола корытца. Толщина профиля является контрольным параметром.

Этот вариант расчета может иметь место на этапе эскизного проектирования проточной части турбины, когда определяются основные геометрические параметры. На рисунке 2 в качестве примера показан вариант однопараболических обводов спинки и корытца для рабочей решетки типа Р6332.

Как показал опыт конструирования профилей лопаток турбин, вариант с однопараболической схемой имеет решение всегда (не было случаев отказов в диапазоне реальных заданных исходных параметров).

Изначальная задача программы – разработать профиль лопатки турбины с заданной максимальной толщиной профиля S_{max} . В этом варианте, как известно, спинка описывается одной параболой в контрольном треугольнике gzf , а корытце – двумя параболой в соответствующих контрольных треугольниках, сопряженных в сечении максимальной толщины проектируемого профиля (т. Х рисунок 1).

Для построения парабол была использована ранее разработанная подпрограмма. Для расчета точек парабол были определены координаты (абсцисса, ордината, угол наклона кас-

тельной) точек g, f, l, X, h . Для построения параболических обводов координаты точек были интерполированы кубическими сплайнами (процедура интерполяции кубическим сплайном матрицы координат приведена в работе [1]).

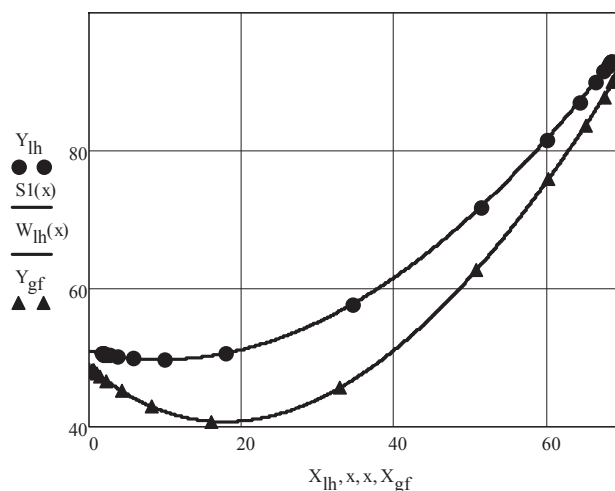


Рисунок 2. Вариант построения профиля типа R6332 по однопараболической схеме: точки - расчетные координаты парабол; линии - интерполяционные кубические сплайны обводов спинки и корытца

Работа ППП была протестирована на построении серии из более чем 30 турбинных профилей в широком диапазоне изменения основных параметров:

- угла установки профиля в решетке $\gamma = 25^\circ \dots 90^\circ$;
- входной угол профиля $\beta_{1л} = 40^\circ \dots 101^\circ$;
- угол выхода потока $\beta_{1л} = 14^\circ \dots 40^\circ$.

На рисунке 3 для примера показаны четыре профиля сопловой и рабочих решеток (следует помнить, что первые две цифры в обозначении профиля показывают входной угол, вторые две – угол на выходе).

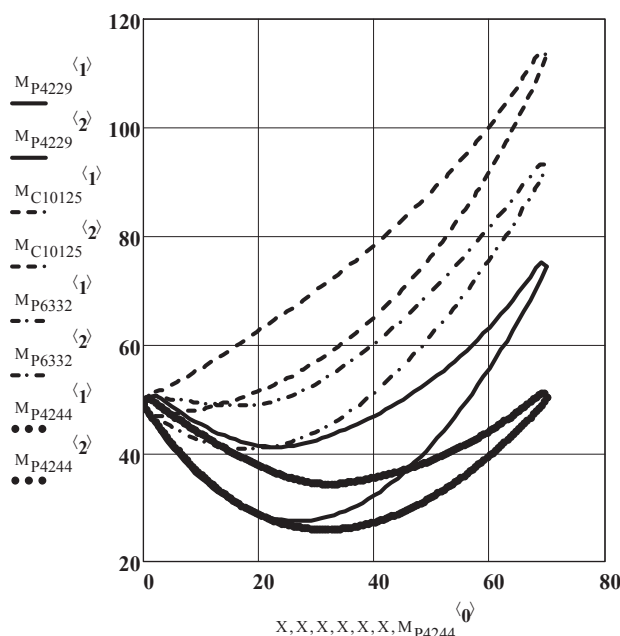


Рисунок 3. Четыре профиля лопатки турбины : — - профиль типа R4244; — - профиль типа R4229; - · - · - · - профиль типа R6332; — —, - сопловой профиль типа C10125

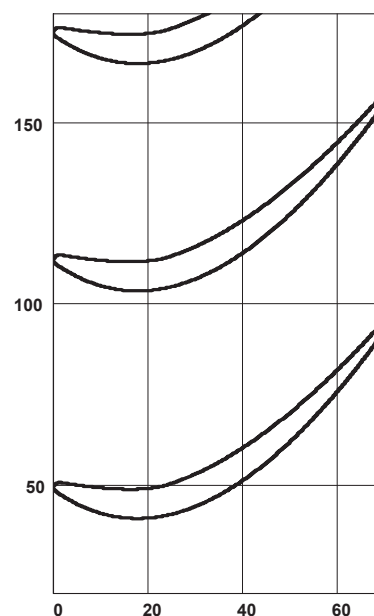


Рисунок 4 – Решетка турбинных профилей типа R6332

Проектирование показало, что программы работают надежно, однако при некотором сочетании исходных параметров наблюдаются трудности, отмеченные еще в работе [1]:

- 1) точка P только случайным образом может оказаться на контуре спинки профиля;
- 2) при построении корытца не всегда имеет место решение, особенно при большой относительной толщине профиля, отвечающее требованиям, предъявляемым к обводам профилей лопаток турбин.

Рекомендации по разрешению первой проблемы, указанные в работе [2], к сожалению, малоэффективны. В [1] даны рекомендации и соответствующие программные процедуры, которые однозначно решают эту проблему:

- 1) задавать шаг решетки, а параметры точки P должны быть контрольными, находящимися в рекомендуемом интервале по углу отгиба (затылочного угла);
- 2) строить спинку профиля из двух кривых, сопряженных в точке P .

Решение второй проблемы также рассмотрено в [1] как теоретически, так и программно – сначала следует строить корытце, а затем при заданной максимальной толщине профиля строить спинку с сопряжением кривых в сечении максимальной толщины, так как вероятность того, что сечение максимальной толщины будет принадлежать однопараболическому обводу спинки, очень мала.

На рисунке 4 показана спроектированная решетка турбинных профилей (тип Р6332). Графический образ решетки является первым выходным элементом автоматизированного проектирования.

Формат выходных данных зависит от того, какие и каким образом будут использоваться полученные данные в дальнейшем. Ниже приведены параметры, которые чаще всего являются выходными.

Уравнение обвода спинки профиля турбинной лопатки типа Р6332 в виде (формат *MathCAD*):

$$S1(x) := \begin{cases} -\sqrt{r_1^2 - (x - x_{01})^2} + y_{01} & \text{if } 0 \leq x < x_g \\ S_{gf}(x) & \text{if } x_g \leq x < x_f \\ -\sqrt{r_2^2 - (x - x_{02})^2} + y_{02} & \text{if } x_f \leq x \leq S \end{cases}.$$

Уравнение корытца профиля:

$$W1(x) := \begin{cases} \sqrt{r_1^2 - (x - x_{01})^2} + y_{01} & \text{if } 0 \leq x < x_l \\ S_{lsm}(x) & \text{if } x_l \leq x < x_{WCmax} \\ S_{smh}(x) & \text{if } x_{WCmax} \leq x < x_h \\ \sqrt{r_2^2 - (x - x_{02})^2} + y_{02} & \text{if } x_h \leq x \leq S \end{cases}.$$

Матрица выходных данных (формат и числовые данные):

$$Mout := \begin{bmatrix} S & y_{CD} & y_{AB} & \beta_m & 0 & r_1 & y_{01} \\ x_{01} & \beta_{1a} & \beta_{2a} & r_2 & y_{02} & x_{02} & x_{1b} \\ y_{1b} & x_{\beta m 1n} & y_{\beta m 1n} & x_{2b} & y_{2b} & x_{2n\beta m} & \partial y_{2n\beta m} \\ b & C_{rmmax} & C_{mmax} & t_{rm} & t_m & \theta_h & x_h \\ y_h & x_{SW} & x_f & y_f & \varphi_1 & \theta_g & x_g \\ y_g & \theta_l & x_l & y_l & \varepsilon_f & \delta_a & \Delta\beta \\ \beta_2' & \beta_2 & a_a & \theta_p & x_p & y_p & \varepsilon_g \end{bmatrix},$$

$$M_{out} := \begin{bmatrix} 70.000 & 50.000 & 94.115 & 01.008 & 00.000 & 01.400 & 49.227 \\ 01.400 & -1.100 & 00.559 & 00.847 & 92.581 & 69.153 & 00.216 \\ 48.481 & -0.531 & 49.665 & 69.870 & 93.032 & 69.418 & 93.749 \\ 82.681 & 00.096 & 07.937 & 00.759 & 62.774 & 02.531 & 68.459 \\ 93.066 & 70.000 & 69.894 & 92.170 & 00.524 & 03.979 & 00.463 \\ 48.187 & 01.361 & 01.691 & 50.597 & 01.065 & 08.000 & 01.235 \\ 33.765 & 35.000 & 34.889 & 02.496 & 40.237 & 113.571 & 02.409 \end{bmatrix}.$$

Ниже показан фрагмент матрицы координат спинки и корытца профиля: первая колонка – абсцисса профиля, мм; вторая колонка – ордината спинки профиля, мм; третья колонка – ордината корытца профиля, мм.

$M_{P6332} =$		0	1	2
	0	0	49.227	49.227
	1	1	47.712	50.569
	2	2	46.872	50.532
	3	3	46.090	50.326
	4	4	45.365	50.130
	5	5	44.695	49.944
	6	6	44.081	49.768
	7	7	43.520	49.603
	8	8	43.013	49.449
	9	9	42.559	49.309
	10	10	42.157	49.12
	11	11	41.806	49.069

Следует отметить, что уравнения профиля и его элементов в формате *Mathcad* могут быть переданы в другие программы среды *Mathcad*.

Для передачи данных в другие среды программирования или построения можно воспользоваться таблицами в виде матриц, формат которых может быть адаптирован к непосредственно выполняемой задаче.

Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы.

1. Разработан пакет прикладных программ (ППП) для ЭВМ в интегрированной среде *Mathcad*, который позволяет в автоматизированном режиме рассчитать параметры и построить решетки профилей турбинных лопаток в широком диапазоне изменения исходных параметров.
2. Для проверки (тестирования) работоспособности программы были построены эскизы более 30 турбинных решеток ГТД. Тестирование подтвердило надежность ППП и адекватность полученных результатов.
3. Разработанный пакет прикладных программ является дальнейшим развитием и модернизацией *CAD* системы по проектированию ГТД и его элементов.
4. Основные теоретические и практические подходы к проектированию, реализованные в настоящей работе, могут быть в дальнейшем применены при использовании других кривых (кривых Безье, лемнискат Бернулли, дробной рациональной функции и т.д.) для построения обводов лопаток турбин.

Литература

1. Виноградов Л.В. Автоматизированное проектирование лопаток турбин: Учебное пособие. – М.: МГТУ «МАМИ», 2010. – 88 с.

2. Жирицкий Г.С., Локай В.И., Максудова М.К., Струнkin В.А. Газовые турбины авиационных двигателей. М.: Государственное научно-техническое издательство Оборонгиз, 1963. – с. 608.
3. Кустарев Ю.С., Костюков А.В. Осевые турбины транспортных ГТД. Учебное пособие. – М.: МГТУ «МАМИ», 2006. – 72 с.
4. Виноградов Л.В. Спинка лопатки турбины из двух сопряженных парабол. / Вестник РУДН, Серия «Информационные технологии и управление», №1, 2007, с. 15-20.

Особенности построения статических характеристик независимых подвесок автомобиля повышенной проходимости с помощью пространственной модели

д.т.н. проф. Горобцов А.С., д.т.н. Карцов С.К., к.т.н. доц. Поляков Ю.А.
ВолгГТУ, МАДГТУ, НИТУ «МИСиС»
polyakovua@mail.ru, (495) 601-51-67

Аннотация. Построена пространственная модель автомобиля повышенной проходимости, позволившая получить статические характеристики независимых подвесок с учетом реальной кинематики элементов подвесок и особенностей их установки на автомобиле.

Ключевые слова: статические характеристики, независимая подвеска, пространственная модель автомобиля повышенной проходимости.

Введение

В условиях современного развития автомобильного рынка производители вынуждены искать способы сокращения времени на разработку и доводку новых образцов колесных машин, к числу которых относится применение расчетных моделей, основанных на точном представлении уравнений движения элементов конструкции автомобиля как механической системы. При этом достаточно интенсивно развиваются постановки задач в расширенной трактовке, что предполагает отказ от гипотезы малых перемещений тел и позволяет осуществить достаточно полный учет в расчетной схеме автомобиля геометрической нелинейности движения элементов конструкции на базе дифференциально-алгебраических уравнений больших движений тел [1].

Динамическая модель автомобиля повышенной проходимости с независимыми подвесками колес

Для исследования вибронагруженности автомобиля повышенной проходимости с независимыми передней и задней подвесками с использованием программной системы ФРУНД [2] была создана математическая модель пространственных колебаний его конструкции. При этом учитывается динамика его движения по случайному микропрофилю дороги, нелинейность характеристик элементов подвесок, систем виброзащиты, виброизоляции и шин.

Динамическая модель конструкции автомобиля представляет собой механическую систему, состоящую из абсолютно твердых тел (рама, силовой агрегат, раздаточная коробка, рычаги рулевого привода передних управляемых колес, передний мост, задний мост, подсистемы «водитель – сиденье»). Каждое из них имеет 6 степеней свободы, связанных между собой элементами, моделирующими направляющие рычаги подвесок колес, шины, виброизоляторы агрегатов, стабилизаторы и амортизаторы (рисунок 1).

Кузов крепится к раме автомобиля в восьми точках. Продольно расположенный двигатель с коробкой передач в сборе установлен на раме на двух передних и двух задних виброизоляторах.

Особое внимание уделено независимым подвескам колес (рисунок 2). Направляющий аппарат подвески каждого из колес представлен двумя рычагами, качающимися в поперечной плоскости.

В качестве упругого элемента каждой подвески выступает винтовая цилиндрическая пружина, расположенная соосно с амортизатором. Нижняя опорная чашка пружины уста-