Ю. А. Дьячков
И. П. Торопцев
А. А. Генералова

2018

Моделирование систем в автомобиле- и тракторостроении

23.00.00 «Техника и технологии наземного транспорта»
05.02.00 «Машиностроение и машиноведение»
05.05.00 «Транспортное, горное и строительное машиностроение»

Учебное пособие

УДК 629.3.001;621.001.5
ББК 30в6
Д 938

Рецензенты: Рылякин Е. Г. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Дьячков, Юрий Алексеевич
Торопцев, Иван Петрович
Генералова, Александра Александровна

Д 938 Моделирование систем в автомобиле- и тракторостроении. Учебное пособие – М.: Мир науки, 2018. – Режим доступа: http://izd-mn.com/PDF/23MNNPU18.pdf – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-6041425-1-6

Учебное пособие посвящено одному из важнейших направлений подготовки выпускника технического университета – моделирование технических систем. Рассмотрены основные понятия и определения фундаментальных положений моделирования, алгоритмы методов математического программирования, используемых при проектировании деталей и узлов автотракторной техники. Рассмотрены теоретические и алгоритмические аспекты методов конечномерной оптимизации. Структура всех разделов учебного пособия однотипна и ориентирована на полный цикл изучения задачи оптимизации от теоретических основ до алгоритмизации конкретных методов.

В качестве базовых для выполнения заданий в рассматриваемых примерах использована среда автоматизированного математического проектирования MathCAD, среда автоматизированного проектирования и анализа SolidWorks с приложениями Simulation Xpress, SolidWorks Simulation, SolidWorks Flow Simulation, SolidWorks Motion.

Издание предназначено для студентов, изучающих дисциплины, связанные с моделированием и автоматизированным проектированием систем автомобилестроения направлений 23.00.00 «Техника и технологии наземного транспорта», 05.02.00 «Машиностроение и машиноведение», 05.05.00 «Транспортное, горное и строительное машиностроение». Может быть полезным для аспирантов и преподавателей соответствующего профиля.

ISBN 978-5-6041425-1-6

© Дьячков Юрий Алексеевич
© Торопцев Иван Петрович
© Генералова Александра Александровна
© ООО Издательство «Мир науки», 2018

Оглавление

Предисловие 4

1. Построение и оценка физических моделей 5

2. Построение и оценка статических моделей 12

3. Разработка системы автоматической параметрической оптимизации 17

4. Разработка системы решения ОДУ с параметрами 21

5. Моделирование сборки конструкции и процесса её функционирования в системе SolidWorks 30

6. Расчёт НДС и оптимизация параметров деталей в модуле SimulationXpress . 50

7. Исследование и оптимизация параметров сборок в SolidWorks Simulatoin ... 58

8. Исследование динамики конструкции в системе SolidWorks Motion 75

9. Исследование конструкции в системе SolidWorks Flow Simulation. Внутреннее течение 84

10. Исследование конструкции в системе SolidWorks Flow Simulation. Внешнее течение 98

ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебном пособии излагаются общие свойства, особенности и алгоритмы моделирования сложных систем в области автомобиле- и тракторостроения; предлагаются разные подходы к построению моделей сложных систем, а также рассматриваются методы моделирования узлов и агрегатов автотракторной техники, базирующиеся на номенклатуре функций системного анализа. Целью учебного пособия является формирование у студентов знаний основных положений теории моделирования технических систем в области автомобиле- и тракторостроения, практических навыков постановки, решения задач моделирования машиностроительного направления, интерпретации результатов решения. В рамках цели в ходе практических и лабораторных занятий излагаются типология задач моделирования, методы их решения с учетом многокритериальности реального проектирования автотракторной техники, рассматриваются способы интеграции оптимизационных задач в процесс проектирования на основе специализированных модулей CAD/CAE-систем и специализированных пакетов прикладных программ оптимизации, в том числе при выполнении проектов специалистами, работающими по направлению 23.00.00 «Техника и технологии наземного транспорта», 05.02.00 «Машиностроение и машиноведение», 05.05.00 «Транспортное, горное и строительное машиностроение».

1. ПОСТРОЕНИЕ И ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Цель работы:
формирование и совершенствование практических навыков построения физических моделей процессов.

СПРАВКА

В случаях, когда изучение реальных процессов и явлений по тем или иным причинам затруднительно, невозможно или нецелесообразно в реальном масштабе определяющих эти процессы параметров и характеристик, их исследование осуществляют на физических моделях, а полученные при этом данные затем обобщают. Такое обобщение становится возможным при соблюдении определенных условий - условий подобия.

Теоретической базой построения и исследования физических моделей являются анализ размерностей и теория подобия. При этом теория подобия определяет условия возможного обобщения полученных на моделях данных, а анализ размерностей используется для формирования этих условий.

Первоначально анализ размерностей использовался как технический прием, позволяющий в ряде случаев сократить число исследуемых параметров процессов путем формирования их безразмерных комбинаций. Вместе с тем, он может использоваться и для построения математических моделей изучаемых явлений, если выявлены определяющие их параметры и характеристики.

Различные физические величины связаны между собой определенными соотношениями. Если некоторые величины принять за основные и ввести для них определенные единицы измерения - размерности, то размерности остальных величин, называемых производными от основных, можно определенным образом выразить через основные.

На практике можно использовать три, две, одну основную размерности, пользоваться только безразмерными величинами. История человечества богата примерами оригинальных единиц измерения, таких как «локоть», «ладонь», «дюйм» - длина верхней фаланги большого пальца, «ярд» - длина отрезка ткани, зажатой одним концом зубами, а другим - отведенной в сторону рукой, и т.д. В ряде случаев одно название величины имеет различную меру. Так «румб» в геодезии - угол между меридианом и направлением на выбранную точку, отсчитываемый от меридиана в обе стороны от 0 до 90 градусов; в морской навигации - мера угла окружности горизонта, разделенная на 32 румба, а в метеорологии - на 16. Можно привести и другие примеры.

Наибольшее распространение получила система трех измерений: масса [M], линейный размер (длина) [L], время [T] (знак [ ] является символом размерности). Их выбор удобен тем, что они, по нашему мнению, легко поддаются измерению и достаточно фундаментально описывают окружающую действительность. Размерности остальных физических величин выводятся через принятые в качестве основных. Эта система просто привычна для наших ощущений, хотя практика инженерного эксперимента предполагает выбор наиболее удобного для исследования комплекса основных размерностей. Например, в механике наряду с указанной широко используется системы, в которых основными являются [F] (сила), [L], [T]; [M], [L], [T], [V] (объем) и т.д.; нередко размерность времени опускается. Каких- либо объективных аргументов в пользу такого предположения привести невозможно. В каждом конкретном случае исследователь вправе самостоятельно определять число и номенклатуру системы основных размерностей.

Если в систему входят величины, связанные с понятием "тепло", то к указанным размерностям следует добавить еще одну - [τ] - температуру (для построения формул

динамики), или [H] - тепловую энергию (для построения «тепловой» формулы). Для электрических и магнитных составляющих добавляются: [K] - диэлектрическая постоянная (используется, как правило, в качестве основной при моделировании электростатических свойств явлений), [μ] - постоянная магнитного поля (используется, как правило, в качестве основной при моделировании электромагнитных свойств явлений), либо скорость распространения электромагнитных волн в среде [c].

Методы анализа размерностей во многом основаны на работах Фурье, который сформулировал принцип однородности по размерности. Он водится к утверждению, что любое уравнение корректно только в том случае, если все его члены имеют одинаковую размерность - показатели степеней при основных размерностях одинаковы у всех членов уравнения, а его форма не зависит от единиц измерения величин одной природы.

Использование аппарата анализа размерностей как для установления взаимосвязи параметров процесса, так и для сокращения числа исследуемых переменных, предполагает выполнение трех условий:

- понимание исследуемого процесса;
- наличие формул размерностей исследуемых величин в принятой основной системе размерностей;
- знание методов обработки размерностей.

Варианты формул размерностей в наиболее часто используемых основных системах приведены в таблицах 1, 2 и 3.

В качестве методов обработки размерностей используются методы Букингема, Релея, поэтапный метод Ипсена, метод линейных пропорциональностей Барра и другие.

Таблица 1 - Размерности механических величин

Величина	Размерности
Длина L	L
Объем W	L^3
Скорость V	LT^{-1}
Кривизна	L^{-1}
Ускорение A или g	LT^{-2}
Плотность p	ML^{-3}
Количество движения	MLT^{-1}
Момент количества движения	ML^2T^{-1}
Сила F	MLT^{-2}
Работа и энергия	ML^2T^{-2}
Мощность	ML^2T^{-3}
Вязкость m	$ML^{-1}T^{-1}$
Кинематическая вязкость ν	L^2T^{-1}
Поверхностное натяжение σ	MT^{-2}
Давление, касательное напряжение P, τ	$ML^{-1}T^{-2}$
Угловая скорость, частота ω ,f	T^{-1}
Расход Q	L^3T^{-1}
Объемный модуль упругости E	$ML^{-1}T^{-2}$

Таблица 2 - Размерности тепловых величин

Величина	Тепловая формула	Динамическая формула
Количество тепла H	H	ML^2T^{-2}
Удельная теплоемкость Cp	$HM^{-1}t^{-1}$	$L^2T^{-2}t^{-1}$
Теплопроводность k	$HL^{-1}T^{-1}t^{-1}$	$LMT^{-3}t^{-1}$
Коэффициент теплопередачи h	$HL^{-2}T^{-1}t^{-1}$	$MT^{-3}t^{-1}$
Энтропия s	Ht^{-1}	$ML^2T^{-2}t^{-1}$
Коэффициент теплового расширения β	t^{-1}	t^{-1}

Таблица 3 - Размерности электрических и магнитных величин

Величина	Электромагнитная формула	Электростатическая формула
Напряженность магнитного поля	$M^{1/2}L^{-1/2}T^{-1}\mu^{-1/2}$	$M^{1/2}L^{1/2}T^{-2}K^{1/2}$
Магнитный заряд полюса	$M^{1/2}L^{3/2}T^{-1}\mu\ 1/2$	$M^{1/2}L^{1/2}K^{-1/2}$
Электрический ток	$M^{1/2}L^{1/2}T^{-1}\mu^{-1/2}$	$M^{1/2}L^{3/2}T^{-2}K^{1/2}$
Электрический заряд	$M^{1/2}L^{1/2}\mu^{-1/2}$	$M^{1/2}L^{3/2}T^{-1}K^{1/2}$
Разность потенциалов	$M^{1/2}L^{3/2}T^{-2}\mu\ 1/2$	$M^{1/2}L^{1/2}T^{-1}K^{-1/2}$
Сопротивление	$LT^{-1}\mu$	$L^{-1}TK^{-1}$
Емкость	$L^{-1}T^{-2}\mu^{-1}$	LK
Индуктивность	$L\mu$	$L^{-1}T^2K^{-1}$
Магнитная проницаемость	μ	$L^{-2}T^2K^{-1}$
Диэлектрическая постоянная	$L^{-1}T^2\mu^{-1}$	K

***Условия подобия явлений*.**

Теория подобия и анализ размерностей являются методами частичного анализа. Каждый из них позволяет получить неполный ответ, и конечный результат применения того и другого представляет собой безразмерное функциональное уравнение, пригодное для разработки моделей. Однако если анализ размерностей служит в первую очередь средством интерпретации экспериментальных данных на основе законов моделирования, полученных из уравнения связи безразмерных параметров, то теория подобия и анализ подобия предназначены главным образом для вывода законов моделирования, на основании которых можно получить безразмерное функциональное уравнение.

Инструменты анализа размерностей являются основой для построения физических масштабных моделей, подобных натурным техническим системам. Подобными являются такие технические системы, у которых подобны все характеризующие параметры, т.е. все

векторные величины геометрически подобны, а все скалярные величины пропорциональны в соответствующих точках пространства и соответствующие моменты времени.

При решении технических задач физическое подобие рассматривается как совокупность подобия частных характеристик явления.

Условиями подобия являются:

- принадлежность явлений натуры и модели к одному классу дифференциальных уравнений;
- подобие условий однозначности;
- равенство критериев подобия для натуры и модели в сходственных точках исследуемого пространства.

Первое условие при использовании в модели и натуре тех же физических эффектов выполняется автоматически.

Под подобием условий однозначности понимается подобие начальных и граничных условий, геометрическое, кинематическое и динамическое подобие. Если для исследуемой системы характерны температурные и химические процессы, то в условия однозначности входят также температурное и химическое подобие.

Геометрическое подобие выражается равенством всех соответственных углов и пропорциональность всех линейных размеров:

$\alpha_{1н} = \alpha_{1м}$; $\alpha_{2н} = \alpha_{2м}$; . . . ; $\alpha_{iн} = \alpha_{iм}$;

$$\frac{l_{1н}}{l_{1м}} = \frac{l_{2н}}{l_{2м}} = \ldots = \frac{l_{iн}}{l_{iм}} = k_l = \text{const.}$$

Кинематическое подобие системы определяется тождественностью направления и пропорциональностью величин времени, действующих скоростей и ускорений:

$$\frac{v_{1н}}{v_{1м}} = \frac{v_{2м}}{v_{2м}} = \ldots = \frac{v_{iн}}{v_{iм}} = k_v = \text{const.}$$

Динамическое подобие системы определяется тождественностью направления действия и пропорциональностью вектора сил G или напряжений σ:

$$\frac{G_{1н}}{G_{1м}} = \frac{G_{1н}}{G_{2м}} = \ldots = \frac{G_{iн}}{G_{iм}} = k_G = \text{const,}$$

$\sigma_{1н} / \sigma_{1м} = \sigma_{2н} / \sigma_{2м} = \ldots = \sigma_{iн} / \sigma_{iм} = k_\sigma = \text{const}$.

Температурное подобие и подобие тепловых потоков определяется соответственно геометрическим подобием температурных полей и пропорциональностью всех температур. Химическое подобие предполагает пропорциональность концентраций веществ в сходственных точках пространства.

При моделировании физических явлений масштабы k_l , k_v , k_G , k_σ и другие называют *масштабами модели (масштабами моделирования, коэффициентами подобия).*

В соответствии со свойствами пропорции из соотношения

$$\frac{l_{2н} - l_{1н}}{l_{2м} - l_{2м}} = \frac{\Delta l_{iн}}{\Delta l_{iм}} = k_l = \text{const}$$

следует правило замещения:

$\lim(\Delta l_н / \Delta l_м) \Delta_l \to 0 = dl_н / dl_м = k_l = \text{const,}$

из которого ясно, что при установлении физического подобия явлений вместо производных (и подынтегральных выражений) от характерных величин можно рассматривать соответствующие соотношения их конечных значений, которые называются ***интегральными аналогами.*** Последнее следует из положения, что предел постоянной величины равняется самой величине.

Третье условие подобия проверяется контролем равенства значений критериев подобия для натуры и модели в сходственных точках исследуемого пространства переменных.

Критерии подобия отражают в безразмерном виде основные закономерности и явления, характерные для исследуемого объекта. Их число и состав зависят от физической природы явлений.

ПРИМЕР

Построение физической модели на основе метода Букингема

Постановка задачи: сформировать математическую модель и определить масштабные коэффициенты для построения физической модели силового гидравлического устройства автомобиля (рисунок 1), основными параметрами и характеристиками которого приняты:

F - силовое воздействие;

L - линейные размеры конструкции;

V - скорость движения элементов конструкции; p - плотность рабочей жидкости;

m - вязкость рабочей жидкости;

g - ускорение свободного падения.

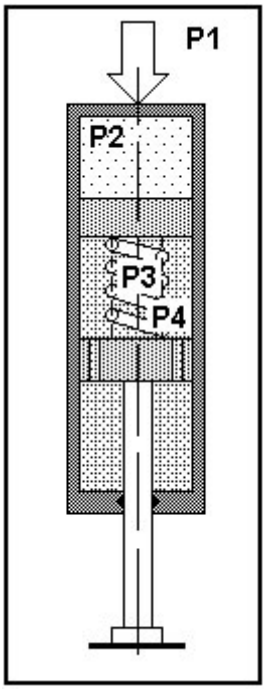


Рисунок 1 – Силовое устройство

Решение.

По методу Букингема выбираются три основные величины (выберем для примера в качестве основных V, p, L), а остальные выражаются через них в виде

$$H = kV^{x} p^{y} L^{z},$$

где H - искомая величина (все исследуемые параметры кроме выделенных в правой части последнего равенства);

k - безразмерный коэффициент пропорциональности.

Уравнивая левые и правые части этого соотношения по размерности и учитывая, что в системе основных размерностей [M], [L], [T]

$$V = LT^{-1},\ p = ML^{-3},\ L = L,$$

получим:

$$L^{s} M^{k} T^{h} = L^{x-3y+z} M^{y} T^{-x}.$$

размерность искомой величины — размерность правой части исходного соотношения

Далее следует подставить в левую часть этого уравнения последовательно размерности для величин F, P, m, g, и в каждой подстановке решить свою систему

уравнений:

$s = x-3y+z$;

$k = y$;

$h = -x$.

Для выражения сил $s = k = 1$, $h = -2$. Тогда $F = kV^2 p L^2$.

Для остальных величин получим

$m = k_1 V p L$;

$P = k_2 V^2 p$;

$g = k_3 V^2 L^{-1}$.

Входящие в полученные зависимости коэффициенты k_i подлежат экспериментальному определению. В рассмотренном примере все они равны единице, т.е. полученные зависимости выражают объективные закономерности исследуемого процесса.

Масштаб сил по критерию Ньютона определяется соотношением

$$K_{FNe} = K_P K_L^2 K_V^2.$$

Переходя к основным размерностям по каждой составляющей, получим:

$K_P = 1$ (натурный образец и модель выполнены из одного материала);

$K_V = K_L/K_T$, при одном масштабе времени ($K_T = 1$) $K_V = K_L$;

$K_{FNe} = K_L^3$.

Аналогичным образом определяем остальные масштабные коэффициенты.

ЗАДАНИЕ

Определить математические зависимости для основных характеристик процесса и масштабные коэффициенты для построения физической модели рабочего инструмента самоходного разрыхлителя почвы (рисунок 2). Для проведения размерного анализа в качестве основных рекомендуется использовать комплекс механических характеристик, определяющих энергообмен в исследуемой системе:

ρ - плотностью грунта, характеристика инерционного движения [ML^{-3}];

g - ускорение свободного падения, показатель действия сил тяжести [LT^{-2}];

μ - коэффициент динамической вязкости, показатель действия сил межслойного трения [$ML^{-1} T^{-1}$];

E - модуль упругости среды (коэффициент объемного сжатия) - показатель действия упругих сил [$ML^{-1} T^{-2}$];

c - скорость звука, показатель действия сил высокоскоростного сжатия [LT^{-1}];

p - давление, показатель действия сил давления, кавитации [$ML^{-1} T^{-2}$];

ρ'_l - изменение плотности по направлению, показатель процесса перемешивания взаимодействующих сред [ML^{-4}].

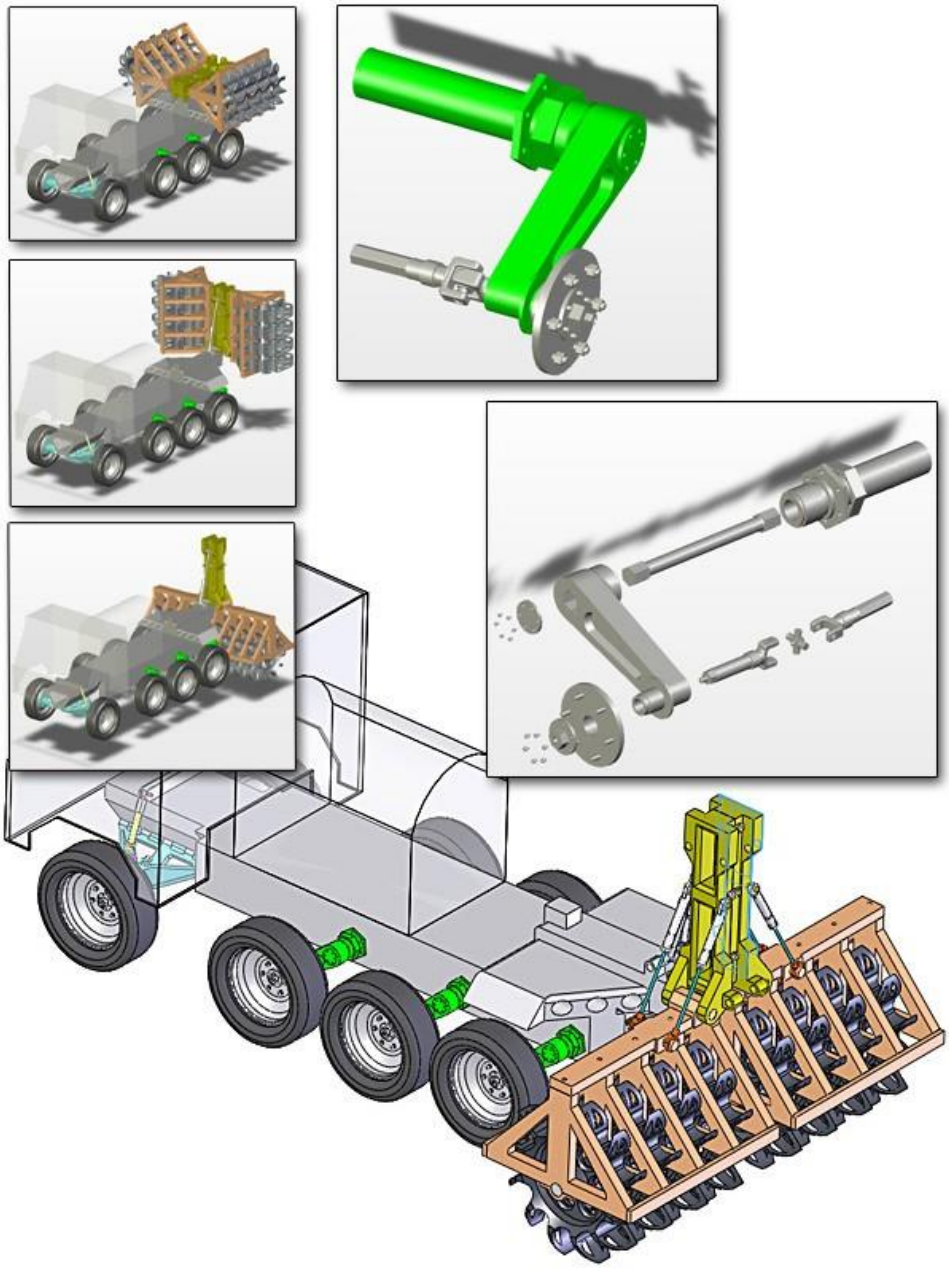


Рисунок 2 – Самоходный разрыхлитель почвы

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие размерности физической величины.
2. Основная система размерностей.
3. Условия подобия явлений.
4. Критерии подобия
5. Типовые критерии подобия механических систем.
6. Способы определения критериев подобия.
7. Способы определения масштабных коэффициентов

ЛИТЕРАТУРА

1. Шенк Х.Теория инженерного эксперимента. - М.: Мир, 1972. - 381 с.
2. Щарп Дж. Гидравлическое моделирование. - М.: Мир,1984. - 280 с.

2. ПОСТРОЕНИЕ И ОЦЕНКА СТАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Цель работы:
- формирование и совершенствование практических навыков построения статистических моделей процессов;
- формирование и совершенствование практических навыков оценки статистических моделей процессов;
- развитие навыков работы в среде MathCAD.

СПРАВКА

В практике проектирования изделий автомобиле- и тракторостроения широкое применение находят статистические модели, связывающие в явном виде параметры исследуемой конструкции с характеристиками, принимаемыми критериями качества изделия. Особенностью таких моделей является их относительная простота последующей реализации. Недостатком таких моделей является отсутствие возможности отражения реального исследуемого процесса. По существу, статистические модели заменяют собой реальный процесс «аналогичным» поведением в некоторой заданной области изменения исследуемых параметров.

Построение статистических моделей основано на данных активного и пассивного экспериментов. При активном экспериментировании используют возможности математической теории планирования эксперимента. При этом вид модели выбирается исходя из принимаемого плана эксперимента. Как правило, это полиномы до третьего порядка включительно. При пассивном эксперименте исходными данными являются результаты, полученные по результатам исследования без учета требований плана. В любом варианте основным моментом при построении статистической модели является установление неизвестных коэффициентов, оценка их значимости и проверка адекватности модели на основе инструментария теории вероятности и математической статистики.

ПРИМЕР

Построение модели процесса

Постановка задачи: построить полиномиальную модель для определения расхода топлива автомобиля ЗИЛ-130 в зависимости от четырех факторов:

x_1 - пересеченность продольного профиля дорог (П);
x_2 - коэффициент сопротивления качению (f);
x_3 - помехонасыщенность маршрута (К);
x_4 - удельная мощность (Nуд).
Уровни варьирования приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Уровни варьирования факторов

Уровни	Факторы			
	x_1	x_2	x_3	x_4
	П, %	f	К, град/км	Nуд, Вт/Н
Средний	33.7	0.0256	30	1.17
Интервал	17.1	0.0135	25	0.15
Нижний	16.6	0.0130	5	1.02
Верхний	50.9	0.0400	55	1.33

Переход от действительных значений к кодированным осуществляется по формулам:
x_1 = (П-33.7)/17.1;
x_2 = (f-0/0256)/0.0135;
x_3 = (К-30)/25;
x_4 = (Nуд -1/17)/0.15.

Матрица планирования и результаты параллельных опытов представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Матрица планирования

Номер опыта	Переменные				Расход топлива. л/100км				
	X_1	**X_2**	**X_3**	**X_4**	**Y_1**	**Y_2**	**Y_3**	**$Y_{ср}$**	**$Y_{теор}$**
1	-	-	-	-	40.0	40.7	39.0	39.9	40.28
2	+	-	-	-	53.0	52.5	53.5	53.0	52.60
3	-	+	-	-	58.5	59.0	57.6	58.4	58.03
4	+	+	-	-	67.6	67.0	68.2	67.6	67.98
5	-	-	+	-	52.1	52.8	51.9	52.3	51.90
6	+	-	+	-	60.7	60.5	61.2	60.8	61.18
7	-	+	+	-	63.0	64.0	63.5	63.5	63.88
8	+	+	+	-	71.2	70.7	71.8	71.2	70.80
9	-	-	-	+	43.1	43.8	42.1	43.0	43.38
10	+	-	-	+	57.8	57.3	58.3	57.8	57.42
11	-	+	-	+	61.6	62.1	60.7	61.5	61.12
12	+	+	-	+	72.4	71.8	73.0	72.4	72.80
13	-	-	+	+	55.2	55.9	55.1	55.4	55.00
14	+	-	+	+	65.2	65.3	66.0	65.6	66.00
15	-	+	+	+	66.1	67.1	66.6	66.6	66.98
16	+	+	+	+	76.0	75.1	76.6	76.0	75.62

Расчет коэффициентов уравнения регрессии по формуле:

$$b_i = \left(\sum_{u=1}^{N} x_{iu} y_u\right)/n$$

дает следующие значения:

b_0 = 60.31; b_1 = 5.24; b_2 = 6.84; b_3 = 3.61; b_4 = 1.98; b_{12} = -0.59; b_{13} = -0.76; b_{14} = 0.43; b_{23} = -1.44; b_{24} = 0; b_{34} = 0.

Формула для определения расхода топлива при любом сочетании в заданных интервалах изменения варьируемых параметров имеет вид:

$$Y=60.31+5.24X_1+6.84X_2+3.61X_3+1.98X_4-0.59X_1X_2-0.76X_1X_3+0.43X_1X_4-1.44X_2X_3.$$

По силе влияния на расход топлива факторы располагаются в следующем порядке: коэффициент сопротивления качению, пересеченность продольного профиля, помехонасыщенность маршрута, удельная мощность. При возрастании этих факторов расход топлива увеличивается. Эффекты взаимодействия на порядок меньше линейных эффектов (за исключением эффекта X_2X_3 **).**

Оценка свойств модели

Так как число опытов для всех шестнадцати экспериментов одинаковое, то при использовании зависимости расчета дисперсии опыта $\boldsymbol{S_y^2 = \left(\sum_{u=1}^{N} S_{yu}^2\right)/N_S}$ например для девятого опыта получим:

$$\boldsymbol{S_{y9}^2 = \frac{((43.1-43)^2+(43.8-43)^2+(42.1-43)^2)}{3-1} = 0.73}$$

Просуммировав дисперсии для всех проведенных опытов, получим общую дисперсию опыта $\boldsymbol{S_y^2}$ =5.74/

Перед использованием последней зависимости также следует проверить однородность ряда дисперсий. При однородном дублировании опытов используем критерий Кохрена, который сравнивают с его табличным значением в зависимости от уровня значимости p=0.95, числа степеней свободы **f = n - 1** = **2** и числа опытов **N = 16**

($G^{табл}$ = 0.7341).

$$\boldsymbol{G^{расч} = \frac{S_{yumax}^2}{\sum_{u=1}^{N} S_y^2} = \frac{0.73}{5.47} = 0.127}$$

Ряд дисперсий считается однородным, так как **G расч <G табл** , и ошибка опыта

$S_y^2 = \frac{5.74}{16} = 0.179/$

Оценку значимости коэффициентов уравнения регрессии проводим с использованием доверительного интервала $\Delta_{bi} = t_{\alpha;f1} S_{bi}$, где $S_{bi} = S_y^2$ / N = 0.179/16=0.0112, $t_{\alpha;f1}$=2.92.

Δ_{bi} = 2.92*0.0112 = 0.0327. Следовательно, незначимыми являются коэффициенты при парных эффектах X_2X_4 и X_3X_4, которые и при вычислении дали нулевые значения.

Дисперсию неадекватности определяем по формуле

$$S_{неад}^2 = \frac{\left(\sum_{u=1}^{N}\left(y_{uрасч} \cdot y_{uэксп}\right)^2\right)}{(n-k-1)} = \frac{2.3865}{16-11-1} = 0.5966$$

и критерий Фишера согласно формуле

$F_{f2;f1}^{расч} = \frac{S_{неад}^2}{S_y^2} = \frac{0.5966}{0.179} = 3.33,$

что меньше табличного со степенями свободы 2 и 4, и равного 19.2. Следовательно, модель адекватна.

ЗАДАНИЕ

Определить радиус скругления задка кузова легкового автомобиля и рациональную скорость его движения, при которых суммарное силовое воздействие потока на заднюю часть корпуса было бы минимальным, а момент этого воздействия – максимально возможным для следующих условий:

1. Расчетная схема изделия показана на рисунке 1, а управляемые параметры задка – на рисунке 2.

2. Скорость движения автомобиля изменяется в интервале 20…40 м/с.
3. Отклонение направления воздушного потока от оси автомобиля $\pm 5^{o}$.
4. Атмосферные условия соответствуют норме.
5. Определяемыми функциями являются:

- суммарное силовое воздействие потока на заднюю часть автомобиля F (x_1);
- суммарный момент этого силового воздействия относительно оси Z (отрицательный) Mz (x_2);

Форма определяемых моделей должна соответствовать полному полиному первого порядка. Результаты измерений определяемых функций приведены соответственно в таблицах 3,4.

Таблица 3 – Результаты измерения момента F, Н

№ опыта	Параметры		Результаты эксперимента						
	x_1	x_2	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7
1	-1	-1	169.06	167.34	168.23	170.15	169.58	168.98	170.01
2	1	-1	169.02	169.35	167.14	168.87	170.07	169.03	170.13
3	-1	1	592	593	594	601	592	590	591
4	1	1	598	597	585	595	600	601	597

Таблица 4 – Результаты измерения силы M_z, Н/м

№ опыта	Параметры		Результаты эксперимента						
	x_1	x_2	M_{z1}	M_{z2}	M_{z3}	M_{z4}	M_{z5}	M_{z6}	M_{z7}
1	-1	-1	98.39	97.56	99.45	100.12	96.24	97.35	98.02
2	1	-1	52.14	51.78	51.93	53.45	52.68	52.12	52.78
3	-1	1	336.27	335.67	335.98	336.46	337.12	336.18	335.89
4	1	1	323.86	323.45	322.98	323.17	323.47	322.57	323.46

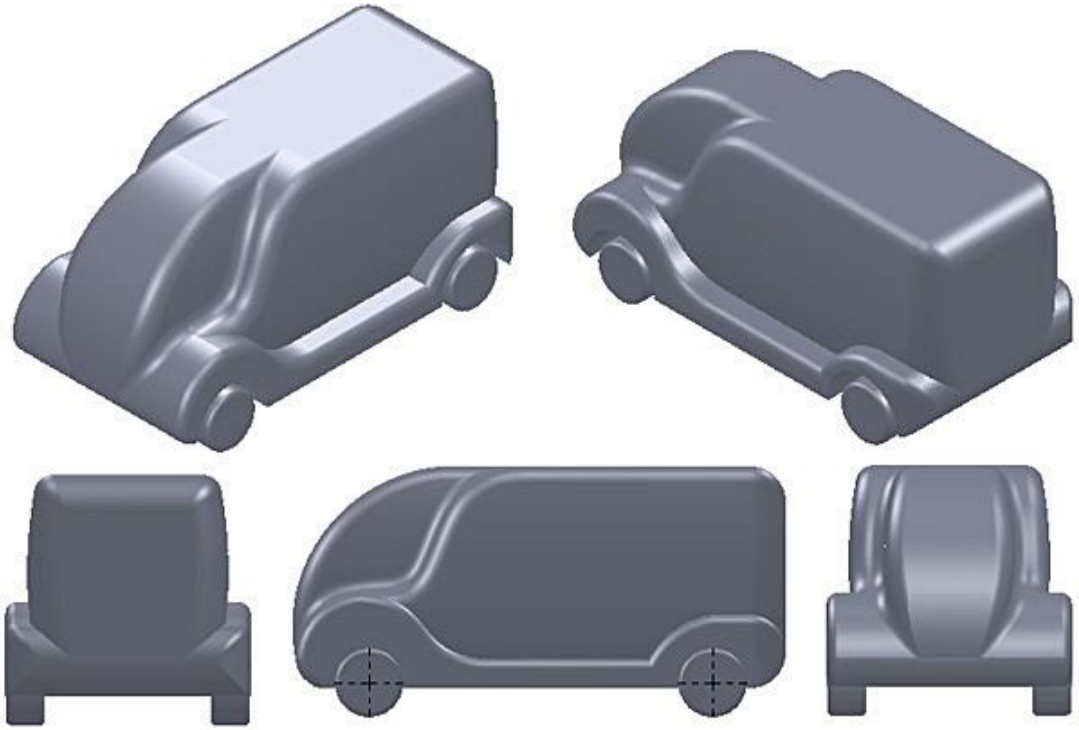


Рисунок 1 – Модель автомобиля

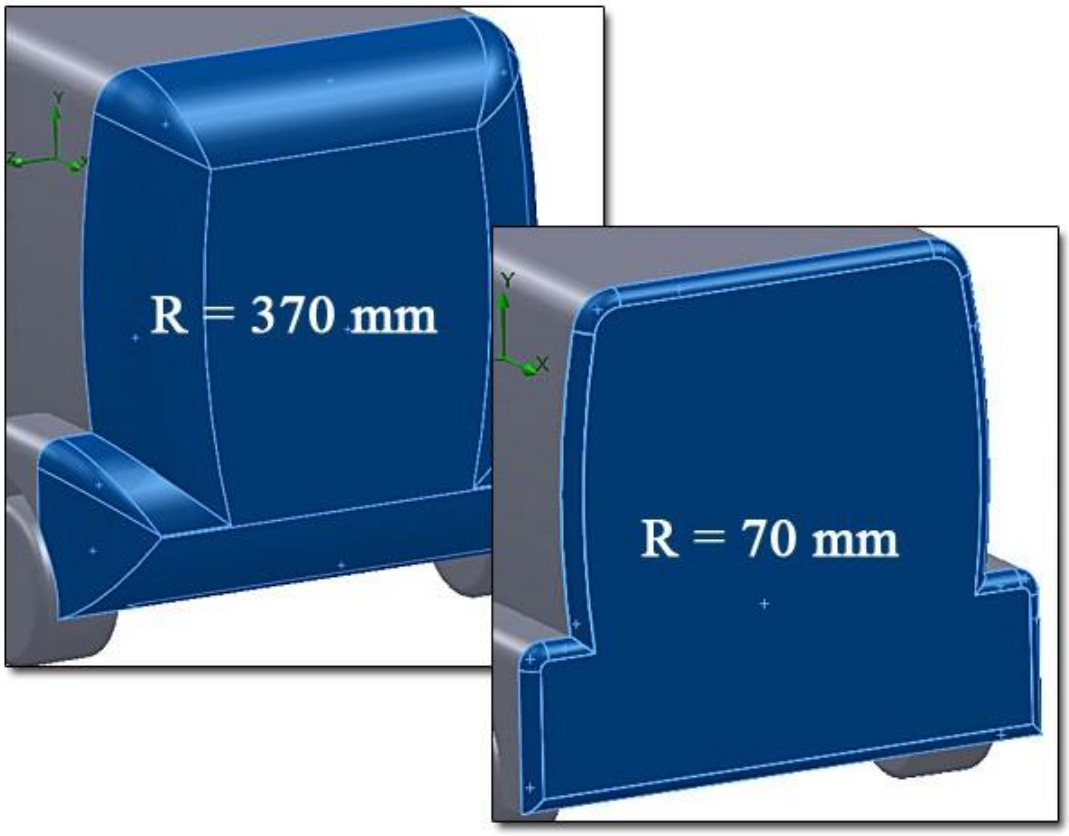


Рисунок 2 – Значения управляемого параметра R

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие распределенной модели.
2. Возможности модулей SolidWorks Flow Simulation по решению задач комплексной оптимизации изделий автомобилестроения.
3. Необходимые условия для решения задач оптимизации с использованием модуля SolidWorks Flow Simulation.
4. Порядок задания цели проекта.
5. Насколько «оптимален» полученный результат.
6. Какие из параметров в наибольшей степени оказывают влияние на каждый из частных критериев качества.
7. Положительные моменты работы в модуле SolidWorks Flow Simulation.

ЛИТЕРАТУРА

1 Нефедов А.Ф., Высочин Л.Н. Планирование эксперимента и моделирование при исследовании эксплуатационных свойств автомобилей. - Львов: Вища школа, 1976.- 160 с.

2 Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. - М.: Наука, 1976, - 390 с.

3 Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. - М.: Финансы и статистика, 1983. - 302 с.

4 Новик Ф.С., Арсов Я..Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперимента. - М.: Машиностроенияе, София: Техника, 1980. - 304 с.

5 Круг Г.К., Сосулин Ю.А., Фатуев В.А. Планирование эксперимента в задачах идентификации и экстраполяции. - М.: Наука, 1977. - 208 с.

3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Цель работы:

- формирование и совершенствование практических навыков построения систем оптимизации моделей процессов;

- развитие навыков работы в среде MathCAD.

СПРАВКА

В практике проектирования изделий автомобиле- и тракторостроения широкое применение находят системы параметрической оптимизации, являющиеся обязательным атрибутом практически всех систем пакетов математического моделирования объектов. Вместе с тем, в ряде случаем проще сформировать собственную систему, обеспечивающую возможность решения однотипных задач «на лету». Как правило, для этого используют методы полного перебора или покоординатного спуска с обучением.

ПРИМЕР

Построение системы параметрической оптимизации на основе метода покоординатного спуска с обучением

Постановка задачи: построить систему параметрической оптимизации на основе метода покоординатного спуска с обучением для полиномиальных моделей второго порядка. Сформировать процедуру построения полиномиальных моделей второго порядка на основе планов Бокса-Дрейпера.

Решение по основным моментам алгоритма реализовано в системе MathCAD.

Программа автоматизированного формирования D-оптимального плана эксперимента Рехтшафнера и оптимизации функции отклика по критерию минимума.
Задаваемые значения выделены жолтым цветом.
Получаемые результаты выделены зеленым цветом.

Число варьируемых переменных $h := 4$

Матрица планирования (план эксперимента)

$M =$

	1	2	3	4
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	1	1	1
3	1	-1	1	1
4	1	1	-1	1
5	1	1	1	-1
6	1	1	-1	-1
7	1	-1	1	-1
8	1	-1	-1	1
9	-1	1	1	-1
10	-1	1	-1	1
11	-1	-1	1	1
12	1	0	0	0
13	0	1	0	0
14	0	0	1	0
15	0	0	0	1

Вектор-строка значений функции отклика U. Значения задаются по результатам эксперимента. Ниже показан пример для 4 параметров варьирования.

U := (27.4 82.4 79.2 59.4 67.6 23.9 50 45.1 52.6 46.3 61.2 55.4 56.3 76.8 73.6)

Модель процесса формируется в виде полинома второго порядка

$$Y = B_0 + \sum_{(i=1..n)} \left(B_{ii} \cdot x_i^2\right) + \sum_{(i=1..n)} \left(B_i \cdot x_i\right) + \sum_{(i=1..n-1,\, j=i+1..n)} \left(B_{ij} \cdot x_i \cdot x_j\right)$$

Вектор-столбец коэффициентов уравнения регрессии B

B =

	1
1	56.543
2	-6.146
3	-6.197
4	4.046
5	3.647
6	5.003
7	5.953
8	16.211
9	13.409
10	2.02
11	3.253
12	2.777
13	3.754
14	2.928
15	1.352

Для автоматизированного режима значимость коэффициентов уравнения регрессии не проверяется

Эксперимертальные значения функции отклика (повтор для сравнения)

U^T =

	1
1	27.4
2	82.4
3	79.2
4	59.4
5	67.6
6	23.9
7	50
8	45.1
9	52.6
10	46.3
11	61.2
12	55.4
13	56.3
14	76.8
15	73.6

Расчетные значения функции отклика

Y1 =

	1
1	27.4
2	82.4
3	79.2
4	59.4
5	67.6
6	23.9
7	50
8	45.1
9	52.6
10	46.3
11	61.2
12	55.4
13	56.3
14	76.8
15	73.6

Оптимизация футкции отклика. Поиск минимального значения.

Преобразования min-max проводятся известным образом.
ВАРЬИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОДИРОВАНЫ В ИНТЕРВАЛЕ -1...+1.
Шаг озменения варьируемого параметрв (один для всех параметров). Шагом изменения можно варьировать. Меньше шаг - больше время расчета

dx := 0.0001

Число исходных точек расчета. Значения варьируемых параметров в исходных точках задаются случайным образом.

nmax := 10000

Верхний XV0 и нижний XN0 уровни варьирования параметров.
Задаются из условий эксперимента.

XV0 := (85 90 500 500)

XN0 := (75 70 100 100)

Кодированные значения варьируемых параметров в точке оптимума

$$SB = \begin{pmatrix} 0.978 \\ -0.92 \\ -0.974 \\ -0.652 \end{pmatrix}$$

Натуральные значения варьируемых параметров в точке оптимума
и монимум значения функции отклика
(последнее число)

$$SA = \begin{pmatrix} 84.889 \\ 70.796 \\ 105.212 \\ 169.59 \\ 24.98 \end{pmatrix}$$

Контрольный пересчет минимума функции отклика

kontr = 24.98

Контроль значений функции отклика в узловых точках плана эксперимента

uxls =

	0	1	2	3	4
0	75	70	100	100	27.4
1	75	90	500	500	82.447
2	85	70	500	500	79.244
3	85	90	100	500	59.414
4	85	90	500	100	67.622
5	85	90	100	100	23.889
6	85	70	500	100	50.022
7	85	70	100	500	45.119
8	75	90	500	100	52.623
9	75	90	100	500	46.319
10	75	70	500	500	61.216
11	85	80	300	300	55.4
12	80	90	300	300	56.3
13	80	80	500	300	76.8
14	80	80	300	500	73.6

ЗАДАНИЕ

Используя данные примера, построить систему оптимизации моделей процесса на основе метода полного перебора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Основные категории теории параметрической оптимизации. Определения.
2. Типовая постановка задачи оптимизации.
3. Основное содержание метода полного перебора. Алгоритм.
4. Варианты фиксации оптимального значения критерия качества и соответствующих ему параметров модели процесса. Условия их использования.
5. Влияние шага дискретизации параметров модели на точность определения критерия качества процесса.
6. Оценка целесообразности применения метода полного перебора.
7. Основные категории теории параметрической оптимизации. Определения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петренко А.И. Основы автоматизации проектирования. – Киев: Техника, 1982. – 295 с.
2. Уайлд Д. Оптимальное проектирование. – М.: Мир, 1981. – 272 с.

4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РЕШЕНИЯ ОДУ С ПАРАМЕТРАМИ

Цель работы:
приобретение навыков построения системы исследования моделей процессов на основе обыкновенных дифференциальных уравнений с параметрами.

СПРАВКА

1. При проектировании процессов, реализуемых в технических системах, всегда решаются задачи, связанные с оптимизацией параметров и характеристик процесса. Типовыми в этом случае являются задачи параметрической оптимизации, задачи оптимального управления и задачи оптимального управления с параметрами. Особенностью первого типа задач является подчиненность параметров процесса определенным закономерностям изменения, описываемых, как правило, дифференциальными уравнениями. В большинстве случаев достаточной является модель процесса на основе обыкновенных дифференциальных уравнений.

2. ***Дифференциальными называются такие уравнения*** (ДУ), *в которых неизвестными являются функции одного или нескольких переменных, и наряду с ними в уравнения входят не только сами функции, но и их производные.*

Различают обыкновенные ДУ и ДУ в частных производных.

Обыкновенные ДУ - производные в уравнении берутся только по одному переменному.

Уравнения в частных производных - в уравнении имеются производные по нескольким переменным.

Большая часть законов физики формулируется в виде ДУ. Любые задачи моделирования и проектирования, связанные с изучением потоков энергии, движения тел сводятся к построению и исследованию систем ДУ. Обыкновенное ДУ можно представить в общем виде

$$\mathbf{F(t, y, y') = 0},$$

или в разрешенном относительно производной виде

$$\mathbf{y' = f(t, y),}$$

где **t** - независимая переменная (во многих задачах это время течения процесса, в общем случае - **x**), **y** - неизвестная функция независимого переменного, **y' = dy/dt** - производная функции **y**, **F** - заданная функция трех переменных, **f** - заданная функция двух независимых переменных.

Для решения ДУ необходимо знать значение зависимой переменной и/или ее функции для некоторого значения независимой переменной. Если эти дополнительные условия задаются при одном значении независимой переменной, то такая задача называется начальной задачей, задачей с начальными условиями, задачей Коши. Если же условия задаются при двух или более значениях независимой переменной, то такая задача называется краевой. В задаче Коши дополнительные условия называются начальными, в краевой задаче - граничными.

Решение ДУ в современной практике осуществляется многочисленными численными методами. Продуктивность использования того или иного метода определяется совокупностью различных факторов, однако, в любом случае их применение целесообразно лишь том случае, когда решение ДУ существует и оно единственно.

В практических приложениях используют одношаговые и многошаговые методы решения подобных задач.

Одношаговые численные методы для нахождения следующей точки решения используют информацию лишь об одном предыдущем шаге. Они предназначены для решения ДУ первого порядка (порядок ДУ определяется порядком искомой производной). К одношаговым относят группу методов Рунге-Кутты, в которых аппроксимация решения по аргументу x производится следующим образом:

Метод первого порядка (метод Эйлера):
dy/dx=Fx,y) y/ x=yi+1-yi)/xi+1-xi),
где ***yi+1*** *- решение уравнения в точке* ***xi+1****. Полагая* ***h = xi+1*** *имеем*
(yi+1-yi)/(xi+1-xi)=(yi+1-yi)/ h = F(xi,yi)
или
yi+1 yi + h * F(xi,yi).

Используя знание начальных значений (**x0, y0**), можно определить следующее приближение, продолжая эту цепочку до окончания процесса решения.

Метод второго порядка:
$y_{i+1} = y_i + h * F(x_{i+h}/2, y'_{i+1}), y'_{i+1} = y_i + h/2 * F(x_i,y_i)$.

Метод третьего порядка:
$y_{i+1}\ y_i + 1/6(k1+4k2+k3), k1 = hF(x_i, y_i), k2 = hF(x_i+h/2, y_i+k1/2), k3 = hF(x_i+h, y_i+2k2-k1)$.

Метод четвертого порядка:
$y_{i+1} y_i + 1/6(k1+2k2+2k3+k4), k1 = hF(x_i, y_i), k2 = hF(x_i+h/2, y_i+k1/2), k3 = hF(x_i+h/2, y_i+k2/2), k4 = hF(x_i+h, y_i+k3)$.

В основе всех одношаговых методов лежит разложение функции в ряд Тейлора, в котором сохраняются члены, содержащие шаг **h** аргумента **x** в степени до **k** включительно. Целое число **k** называется порядком метода. Погрешность на шаге расчета имеет порядок **k+1**.

Методы второго, третьего и четвертого порядка требуют на каждом шаге изменения аргумента соответственно двух, трех и четырех вычислений функции.

Характеристика методов Рунге-Кутты

- Методы используют для своей реализации информацию только о текущей точке и не используют информацию о предыдущих точках расчетов. Это свойство обеспечивает их применение для начала решения уравнений.
- По той же причине приходится многократно вычислять функцию **f(x,y)** и затрачивать на это много машинного времени.
- Используя информацию только об очередной точке решения, эти методы позволяют легко менять величину шага вычислений h. Приближенная рекомендация основана на правиле Коллатца: если отношение **(k2 - k3)/(k1 - k2)** становится большим нескольких сотых, то шаг интегрирования необходимо уменьшить.
- Недостатком методов является отсутствие возможности явной оценки ошибки ограничения.
- Результаты решения во многом зависят от величины шага интегрирования **h**. Его выбор осуществляют сравнением результатов, полученных: при вычислении функции для последующей точки с шагом **h** и двумя шагами **h/2**. Если при этом разница в результатах превышает заданную точность вычисления (заданную, например, в процентах), то шаг уменьшают в два раза (как правила).

Наиболее распространенным в инженерных расчетах является метод Рунге-Кутты четвертого порядка.

В ходе решения задачи появляется дополнительная информация о рассчитанных точках траектории движения системы, которая не используется в одношаговых методах. Применение же многошаговых методов основано на использовании информации о предыдущих вычислениях. Для этого используют две формулы: прогноза и коррекции. Поэтому такие методы известны под названием методов прогноза и коррекции.

В отличие от одношаговой методы прогноза и коррекции не обладают свойством «самостартования». Поэтому при их использовании начальные точки расчета определяются

одношаговыми методами.

Обычно при выводе формул прогноза и коррекции решение уравнения рассматривают как процесс приближенного интегрирования, а сами формулы получают с помощью конечно-разностных методов.

Характеристика методов прогноза и коррекции

- Так как методы используют информацию о ранее вычисленных точках, то с их помощью нельзя начать решение уравнения. Однако, по этой же причине они более экономичны.
- При любом изменении величины шага приходится возвращаться к методам Рунге-Кутты.
- В качестве побочного продукта получается хорошая оценка ошибки вычисления.

Сочетание методов

Возможности рассмотренных методов являются взаимодополняющими друг друга, что делает целесообразным их совместное применение.

- Начать решение с помощью метода Рунге-Кутты и найти вторую точку расчета (первая задается начальными условиями).
- Для вычисления следующих точек использовать метод прогноза и коррекции (например, последний из рассмотренных).
- Если для вычисления очередного значения искомой переменной требуется более двух итераций или если ошибка ограничения слишком велика, следует уменьшить величину шага. Если эта ошибка слишком мала, то величину шага можно увеличить.

Для изменения шага интегрирования последнее еще достаточно точно вычисленное значение искомой переменной следует принять в качестве исходного. Решение следует продолжить методом Рунге-Кутты с этой исходной точки.

ПРИМЕР

Постановка задачи

Исследуется конструкция прямоугольной емкости с подвижными сторонами **a, b** и фиксированной стороной **c.**

Динамика изменения сторон определяется системой уравнений:

a'''+2.32cos(5t)*b'-cos(7t)b''+a=60, если t >или =1.5 с; a'''+1.32sin(3t)*b'-sin(5t)b''+a=300, если t < 0.5 с;
b'''-sin(t)a'-4.5sin(3t)a''+b=130 , если t <2.5 с; b'''+sin(3t)a'-1.2sin(t)a''+b=300 , если t > или = 2.5 с;

с начальными условиями
a = 200 см, b = c = 100 см;
a'(0) = a''(0) = b'(0) = b''(0) = t(0) = 0;

Определить:

1. Характер изменения объема (W) и суммарной боковой поверхности (S) исследуемой емкости на временном интервале t = 0...4 с.

Решение.

1. *Вводим формальные переменные, соответствующие искомым функциям:*

$$y_0 = t \qquad y_1 = a \qquad y_2 = \frac{d}{dt}a \qquad y_3 = \frac{d^2}{dt^2}a \qquad y_4 = b \qquad y_5 = \frac{d}{dt}b \qquad y_6 = \frac{d^2}{dt^2}b$$

2. *Формируем процедуру расчета правых частей уравнений:*

$$\text{prch}(y) := \left| \begin{array}{l} D \leftarrow \left(\begin{array}{l} 1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \left| \begin{array}{ll} 60 - y_1 + y_6 \cdot \cos(7 \cdot y_0) - 2.32 \cdot \cos(5 \cdot y_0) \cdot y_5 & \text{if } y_0 \geq 1.5 \\ 300 - y_1 + y_6 \cdot \sin(5 \cdot y_0) - 1.32 \cdot \sin(3 \cdot y_0) \cdot y_5 & \text{if } y_0 < 1.5 \end{array} \right. \\ y_5 \\ y_6 \\ \left| \begin{array}{ll} 130 - y_4 + 4.5 \cdot \sin(3 \cdot y_0) \cdot y_3 + y_2 \cdot \sin(y_0) & \text{if } y_0 < 2.5 \\ 300 - y_4 + 1.2 \cdot \sin(y_0) \cdot y_3 - y_2 \cdot \sin(y_0 \cdot 3) & \text{if } y_0 \geq 2.5 \end{array} \right. \end{array} \right) \\ D \end{array} \right.$$

3. Формируем процедуру решения уравнений методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности:

```
frk4(y, nn, nk, hag) :=
    for i ∈ nn .. nk
        yy_i ← y_i
        z_i ← 0
        zk_i ← 0
    z ← prch(y)
    for i ∈ nn .. nk
        y_i ← yy_i + hag · 0.5 · z_i
        rk_i ← z_i
    z ← prch(y)
    for i ∈ nn .. nk
        y_i ← yy_i + hag · 0.5 · z_i
        rk_i ← rk_i + 2 z_i
    z ← prch(y)
    for i ∈ nn .. nk
        y_i ← yy_i + hag · z_i
        rk_i ← rk_i + 2 z_i
    z ← prch(y)
    for i ∈ nn .. nk
        rk_i ← hag · (rk_i + z_i)
        y_i ← yy_i + rk_i / 6
    y
```

4. Формируем процедуру управления расчетом и фиксации результатов численного интегрирования. Здесь проводятся вычисление промежуточных значений, изменяемых характеристик процесса, организуются циклы повторных расчетов при вариации параметров в заданных интервалах изменения (оптимизация параметров):

```
raschet(y, nn, nk, hag, tk) := | w ← y
                               | a ← 0
                               | j ← 1
                               | while y0 < tk
                               |     w ← frk4(y, nn, nk, hag)
                               |     for i ∈ nn .. nk
                               |       qj,i ← wi
                               |     j ← j + 1
                               |     y ← w
                               | a ← 1
                               | q
```

*5. Задаём границы интервала изменения аргумента (**t0, tk**), числа точек расчета (**np**), вычисляем шаг интегрирования (**hag**), задаем индексы блока решаемых дифференциальных уравнений (**nn, nk**), начальные значения переменных:*

$t0 := 0$ $\quad tk := 4.5$ $\quad np := 200$ $\quad hag := \frac{tk - t0}{np}$

$nn := 0$ $\quad nk := 6$ $\quad y^T = (0 \;\; 200 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 100 \;\; 0 \;\; 0)$

6. Обращаемся к процедуре управления расчетом с передачей результатов (таблица 1) в матрицу Y.

$$Y := raschet(y, nn, nk, hag, tk)$$

Таблица 1 – Текущие значения параметров процесса

$Y =$

	1	2	3	4	5
16	200.795	6.737	38.956	100.365	3.757
17	200.957	7.645	41.781	100.458	4.492
18	201.14	8.617	44.645	100.568	5.33
19	201.345	9.654	47.531	100.699	6.28
20	201.575	10.756	50.421	100.852	7.351
21	201.83	11.923	53.29	101.031	8.551
22	202.112	13.154	56.107	101.238	9.888
23	202.422	14.447	58.84	101.477	11.37
24	202.762	15.8	61.449	101.751	13.005
25	203.134	17.211	63.893	102.063	14.797
26	203.537	18.674	66.131	102.418	16.753
27	203.974	20.185	68.118	102.818	18.876
28	204.446	21.737	69.811	103.268	21.168
29	204.953	23.324	71.171	103.772	23.632
30	205.496	24.937	72.162	104.333	26.266
31	206.075	26.568	72.756	104.955	...

7. Строим графики в ***np*** *точках (****i*** *= **np**) искомых функций изменения сторон* ***a*** *и* ***b*** *(рисунки 2, 3).*

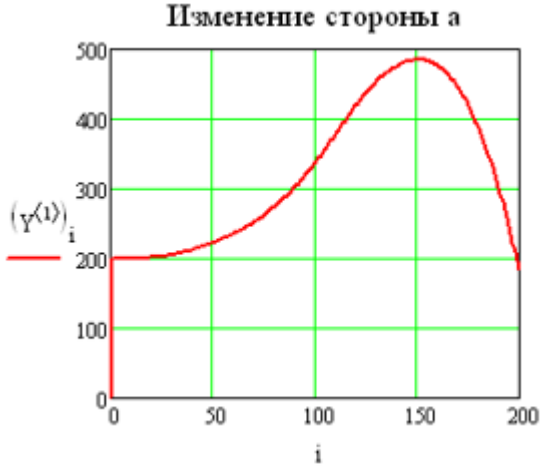


Рисунок 2 – Изменение стороны **a**

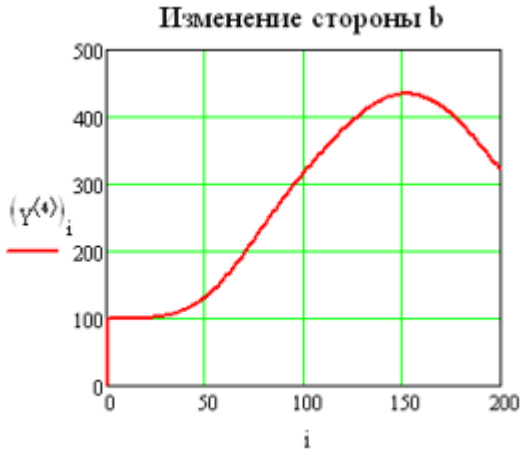


Рисунок 3 – Изменение стороны **b**

8. Рассчитываем текущие значения объема и суммарной боковой поверхности исследуемой емкости:

$$i := 0..np \qquad j := 0..np \qquad c := 100$$

$$W_{i,j} := \left(Y^{\langle 1\rangle}\right)_i \cdot \left(Y^{\langle 4\rangle}\right)_j \cdot c$$

$$S_{i,j} := 2 \cdot \left[\left(Y^{\langle 1\rangle}\right)_i \cdot \left(Y^{\langle 4\rangle}\right)_j\right] + 2 \cdot \left[\left(Y^{\langle 1\rangle}\right)_i \cdot c\right] + 2 \cdot \left(Y^{\langle 4\rangle}\right)_j \cdot c$$

9. Строим графики текущих значений объема и суммарной боковой поверхности исследуемой емкости (рисунки 4, 5)

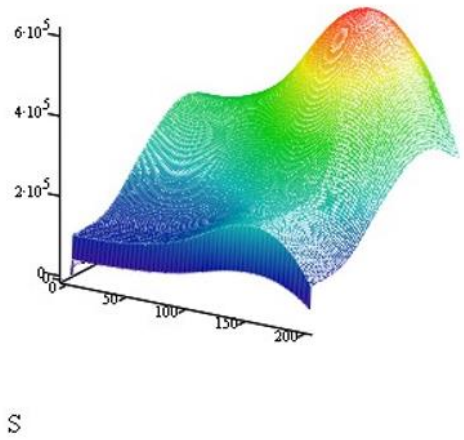


Рисунок 4 – Изменение объёма

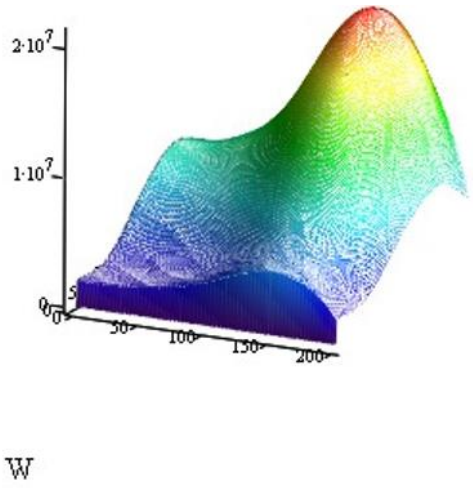


Рисунок 5 – Изменение поверхности

Выводы:

1. Построена система исследования процессов на основе моделей, представленных обыкновенными дифференциальными уравнениями с параметрами.

2. Получены значения и построены графики изменения объема емкости и ее суммарной боковой поверхности по аргументу "время".

ЗАДАНИЕ

1. Установить ограничения по обеспечению положительных значений сторон a, b в процессе решения задачи.
2. Дополнить рассмотренную в примере систему решения обыкновенных дифференциальных уравнений процедурой метода прогноза и коррекции.
3. Анимировать процесс изменения площади a(t)*b(t) для t = 0..tk, tk = 4.2c.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ ПО МЕТОДУ ПРОГНОЗА И КОРРЕКЦИИ

Уравнение прогноза

$p_2=y_0+2hy'_1,$

$y'_1=F(x_1,y_1)$

и коррекции

$c_2=y_1+h(p'_2+y'_1)/2,$

$p'_2=F(x_2,y_2).$

В качестве решения $y_2 = y(x_0+2h)$ берется

$y_2=c_2+E_c,$

где $Ec = (p_2-c_2)/5$ - ошибка коррекции.

Идентификация величин

fst - процедура расчета правых частей ДУ;
nn, nd - начальный и конечный номера ДУ в системе, решаемых совместно;
y[i], yy[i] - y_{j+1} и y_j соответственно для **i-го** уравнения;
j - индекс итерации;
rk[i] - приращение **i-го** уравнения
der[i] - правая часть **i-го** уравнения;
h - шаг интегрирования

Вариант программы последнего метода приведен ниже. Обозначения переменных в программе соответствуют приведенным в тексте.

```
Procedure procor;
begin
fst;
   for i:=nn to nd do
   begin
     ps2[i]:=der[i];
     p2[i]:=yy[i]+2*h*ps2[i];
   end;
fst;
   for i:=nn to nd do
   begin
     yy[i]:=y[i];
     c2:=y[i]+h/2*(der[i]+ps2[i]);
     ec1:=(p2[i]-c2)/5;
     y[i]:=c2+ec1;
   end;
end;
```

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Порядок постановки и решения задач моделирования процессов.
2. Понятие ДУ.
3. Сущность обыкновенных ДУ, ДУ в частных производных.
4. Одношаговые методы решения обыкновенных ДУ. Общая характеристика.
5. Многошаговые методы решения обыкновенных ДУ. Общая характеристика.
6. Общая характеристика методов Рунге-Кутты.
7. Понятие порядка точности метода решения обыкновенных ДУ.
8. Алгоритм анимирования параметров процесса в системе MathCAD.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джонсон К. Численные методы в химии. - М.: Мир, 1983. - 504 с.
2. Понтрягин Л.С. Дифференциальные уравнения и их приложения. - М.: Наука, 1988. - 208 с.
3. Краснов М.Л. Обыкновенные дифференциальные уравнения. - М.: Высш. школа, 1983. - 128 с.
4. Амелькин В.В. Дифференциальные уравнения в приложениях. - М.: Наука, 1987. - 160 с.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ СБОРКИ КОНСТРУКЦИИ И ПРОЦЕССА ЕЁ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ SOLIDWORKS

Цель работы:
приобретение навыков моделирования сборок конструкций и процессов их функционирования, разборки и сборки в системе SolidWorks.

СПРАВКА

В системе SolidWorks можно создать сложные сборки, состоящие их многочисленных компонентов, которые могут являться деталями или другими сборками, называемыми узлами сборок. Для большинства операций поведение компонентов одинаково для обоих типов. Добавление компонента в сборку создает связь между сборкой и компонентов. При открытии сборки программой SolidWorks она находит файл компонента, чтобы отобразить его в сборке. Изменения в компоненте автоматически отражаются на сборке.

Сборку можно создавать, используя проектирование снизу-вверх, проектирование сверху вниз или комбинацию этих двух методов.

Проектирование снизу-вверх

Традиционным является метод проектирования снизу-вверх. Сперва необходимо спроектировать и смоделировать детали, затем вставить их в сборку и использовать сопряжения для расположения деталей. Чтобы внести изменения в детали, необходимо редактировать их по отдельности. Затем эти изменения можно просмотреть в сборке.

Проектирование снизу-вверх является предпочтительным для заранее сконструированных, готовых деталей или стандартных компонентов, таких как крепежные детали, шкивы, двигатели и т.д. Такие детали не меняют свою форму и размер в зависимости от вашего проекта; вы можете использовать другой компонент.

В Проектировании сверху вниз формы, размеры и расположение деталей может быть задано в сборке. Например,

Можно спроектировать кронштейн для двигателя таким образом, чтобы он всегда был правильного размера для поддержки двигателя, даже если двигатель был перемещен. SolidWorks автоматически изменит размеры кронштейна. Эта функциональность особенно полезна при работе с кронштейнами, арматурой и корпусами, которые используются для крепежа других деталей в правильном положении. Также можно использовать проектирование сверху вниз для некоторых элементов (например, установочных болтов) деталей, которые обычно проектируются снизу-вверх.

Проект копировальной машины может быть представлен в компоновочном эскизе, элементы которого представляют собой шкивы, барабаны, ремни и другие компоненты копировальной машины. Трехмерные компоненты создаются в соответствии с этим эскизом. При перемещении или изменении размера элементов чертежа SolidWorks автоматически перемещает или изменяет размеры трехмерных компонентов в сборке. Быстродействие и гибкость эскиза позволяет вам протестировать несколько версий проекта перед построением трехмерной геометрии, а также допускает возможность многих изменений в одном центральном месторасположении.

Преимущество проектирование сверху вниз заключается в том, что внесение изменений в проект не требует от вас большого количества работы. Детали знают, как провести обновление на основе того, как они были созданы.

Можно использовать проектирование сверху вниз для определенных элементов детали, целой детали или сборки. Проектировщики обычно используют проектирование сверху вниз для создания плана своих сборок и для определения ключевых аспектов деталей, специфичных для их сборок.

ПРИМЕР

Постановка задачи

Исследуется сцепление спортивного автомобиля, представленное набором деталей. Модели деталей размещены в папке **parts**. Модель сборки представлена на рисунках 1, 2, 3.

Необходимо:

- осуществить сборку модели, сохранить сборку в файле с именем **sceplenie**;
- для сцепления спортивного автомобиля выполнить «разнесение» деталей сборки (подсборку **verh_prug_pichag** использовать как один элемент), сохранить сборку;
- анимировать вид с «разнесением» в аниматоре.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Для ознакомления с порядком сборки сцепления просмотрите видеоролик ***lw,*** расположенный в папке ***parts*.**

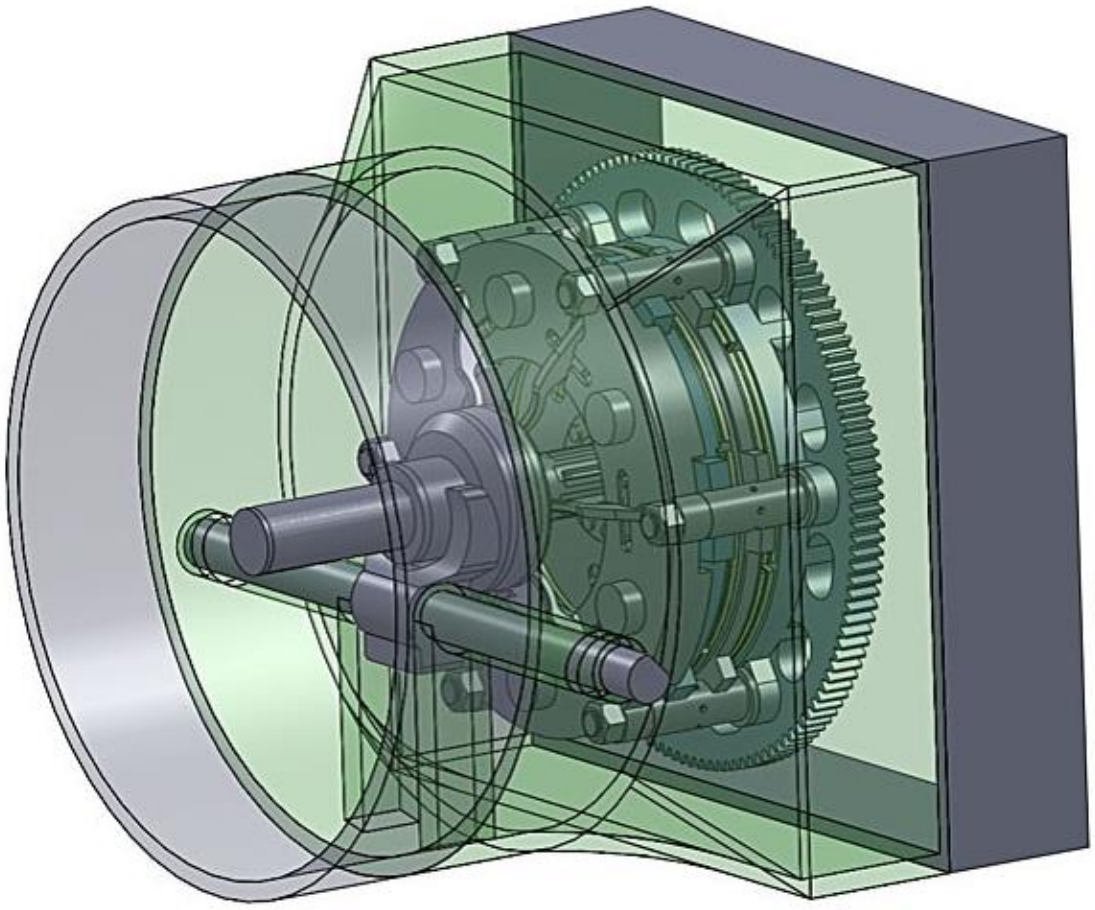


Рисунок 1 – Сборка сцепления

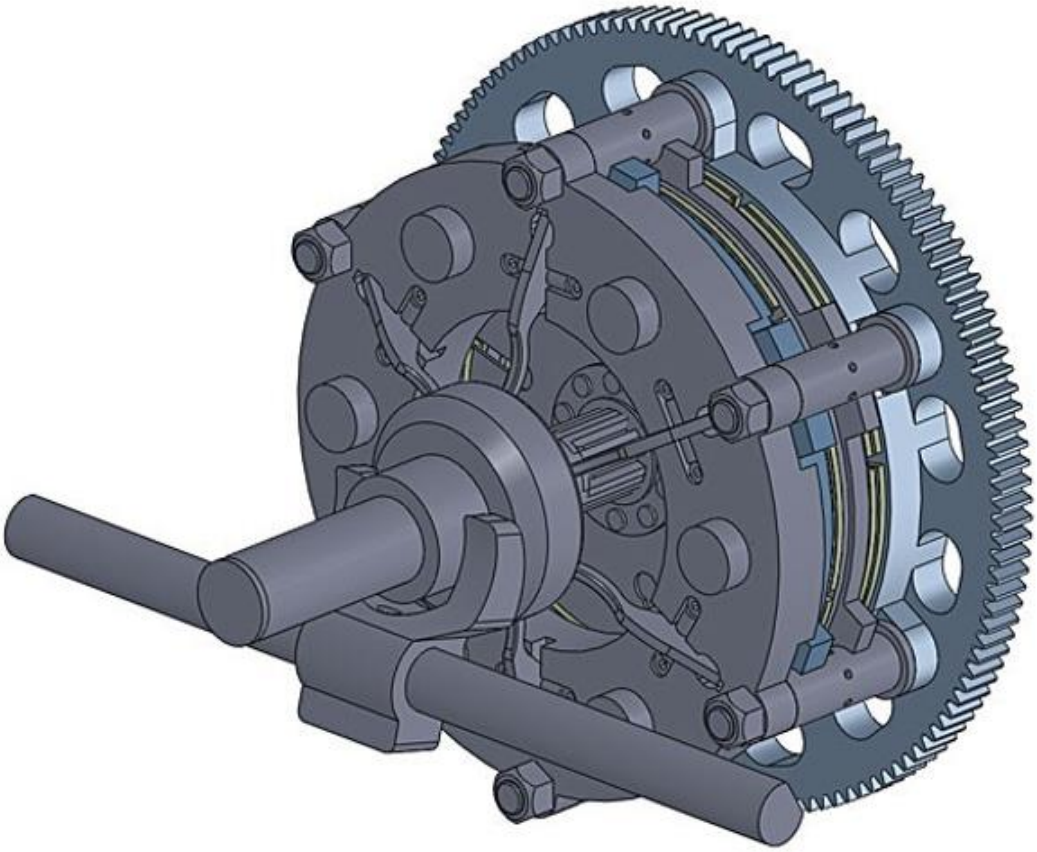


Рисунок 2 – Сборка сцепления

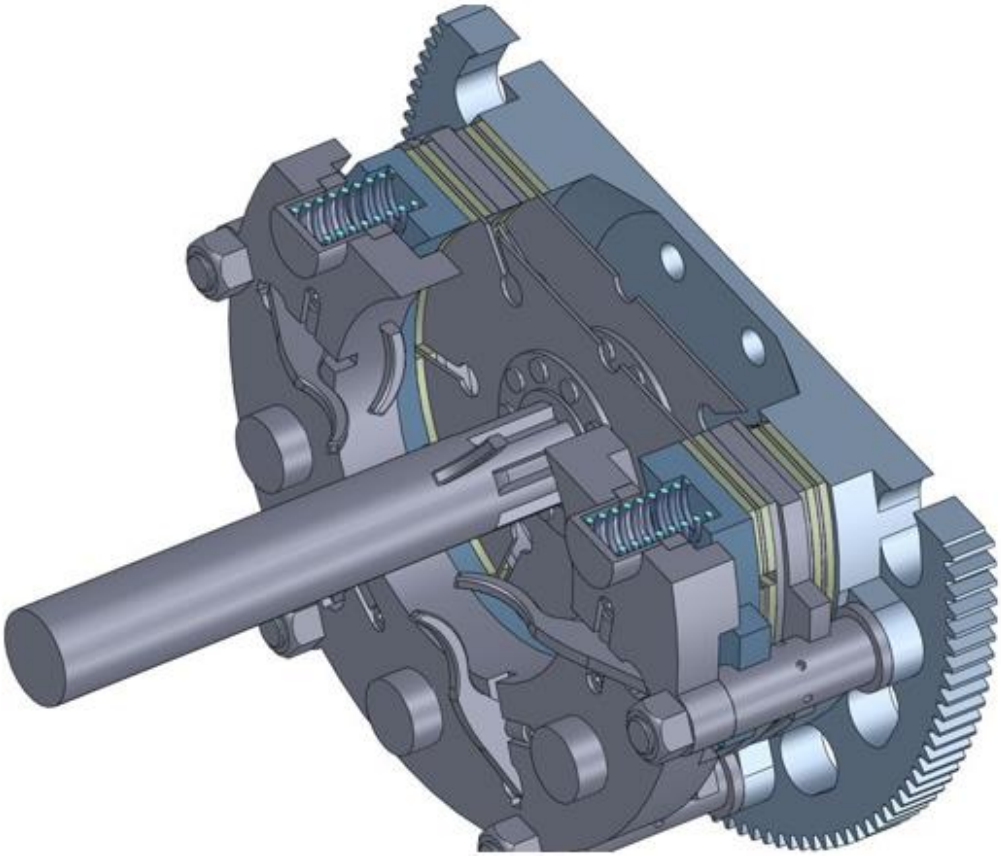


Рисунок 3 – Сборка сцепления

РЕАЛИЗАЦИЯ:

1. Осуществляем сборку сцепления (рисунки 1, 2, 3).
2. Осуществляем разнесение деталей и анимацию (рисунки 4…35).

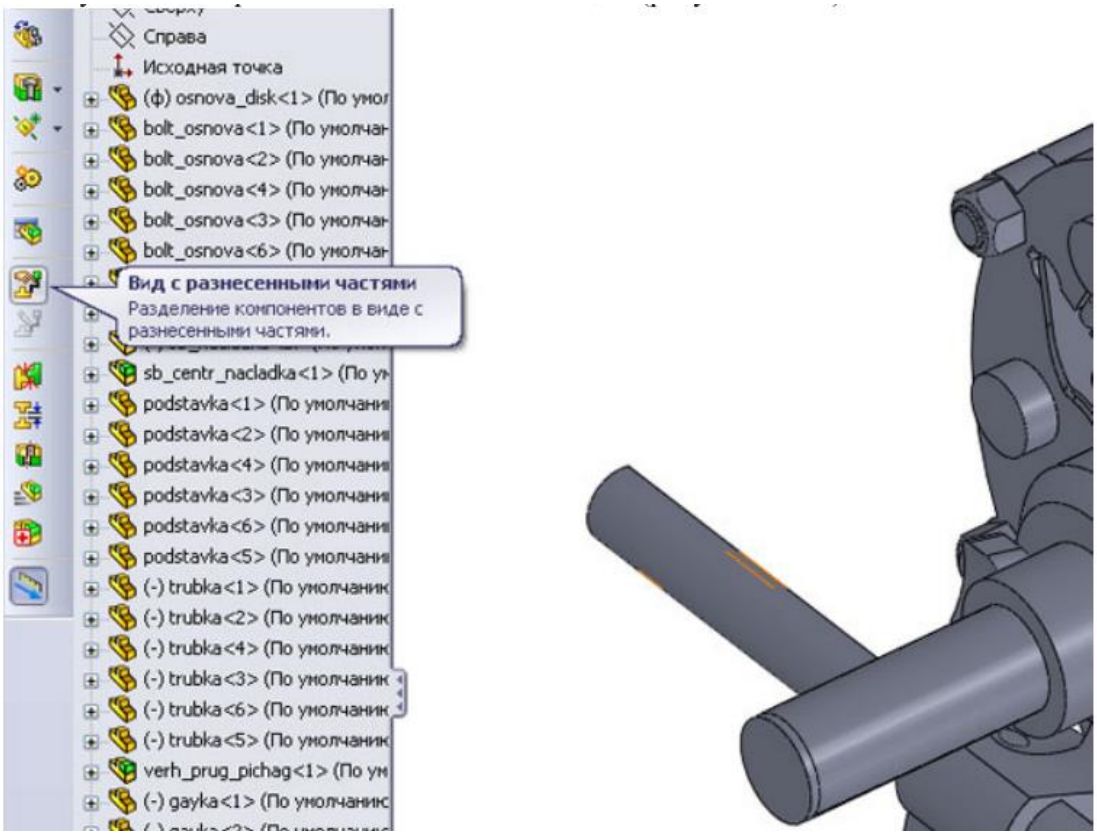


Рисунок 4 – Активизация инструмента разнесения

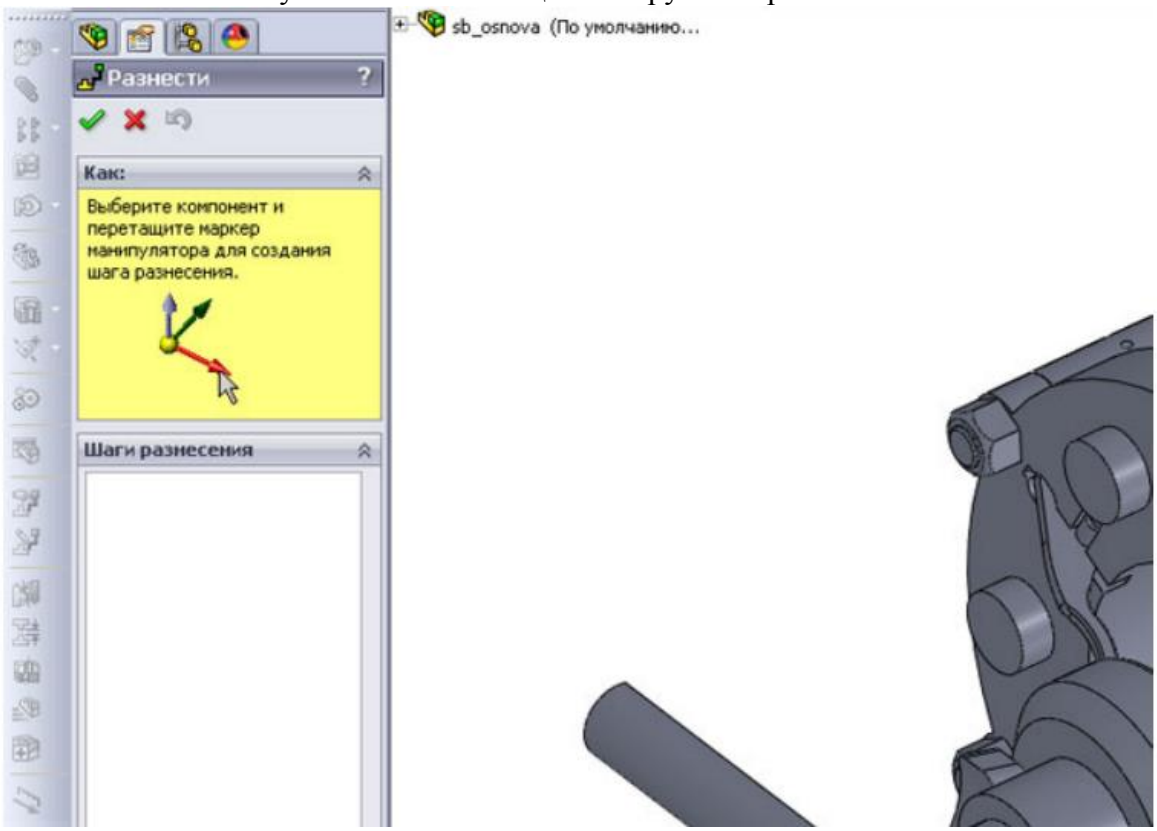


Рисунок 5 – Панель разнесения частей

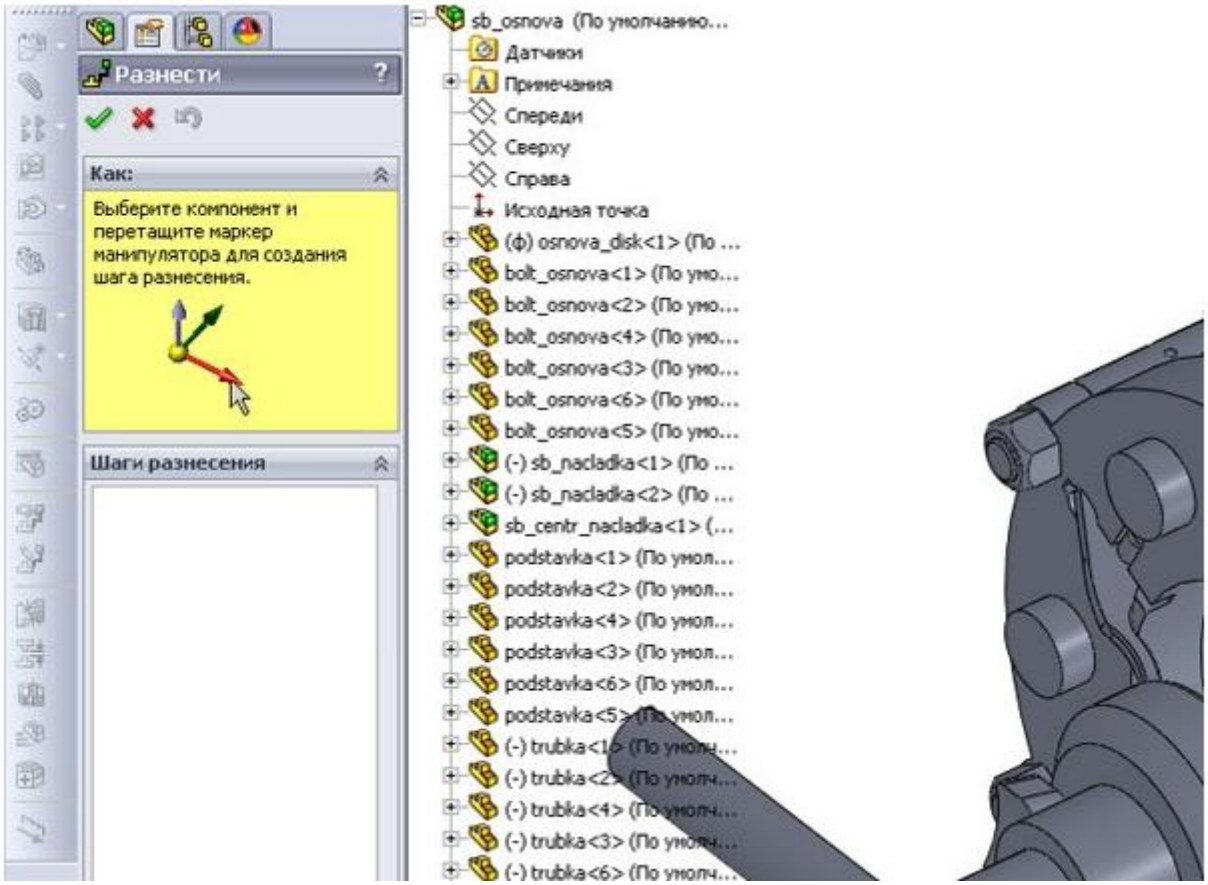


Рисунок 6 – Дополнительная панель сборки

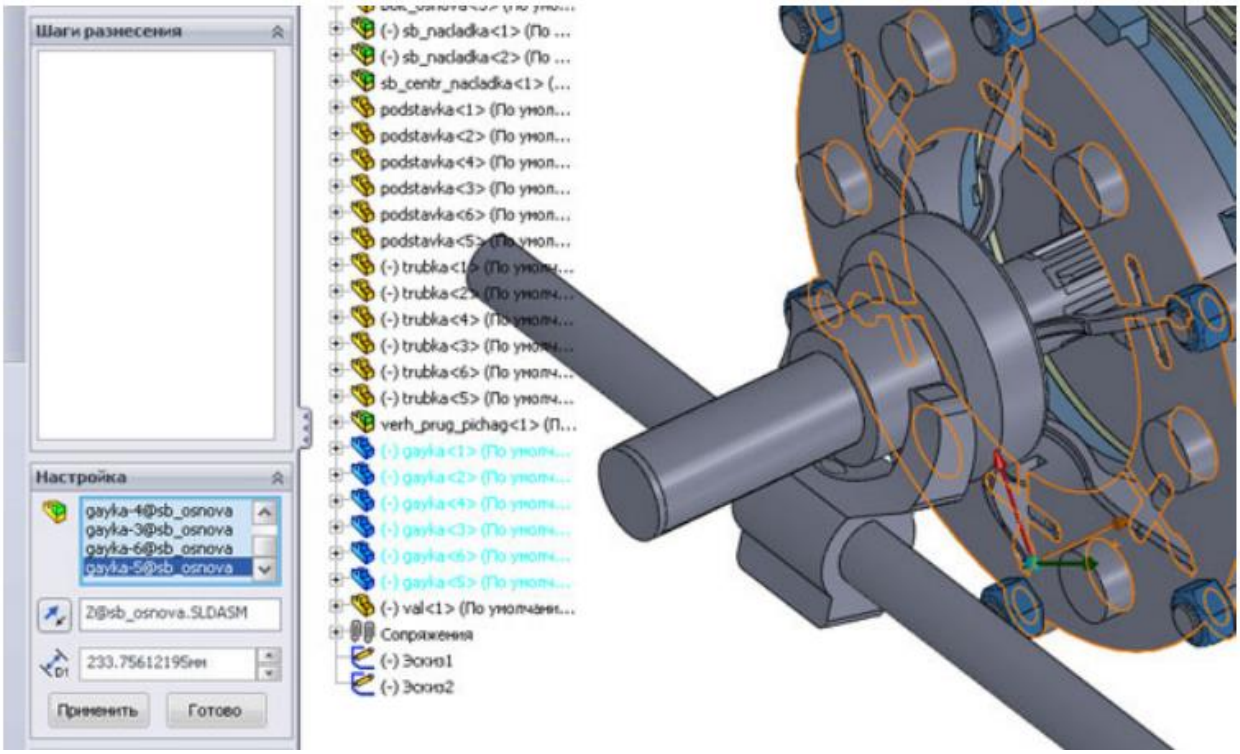


Рисунок 7 – Выделение гаек на дополнительной панели

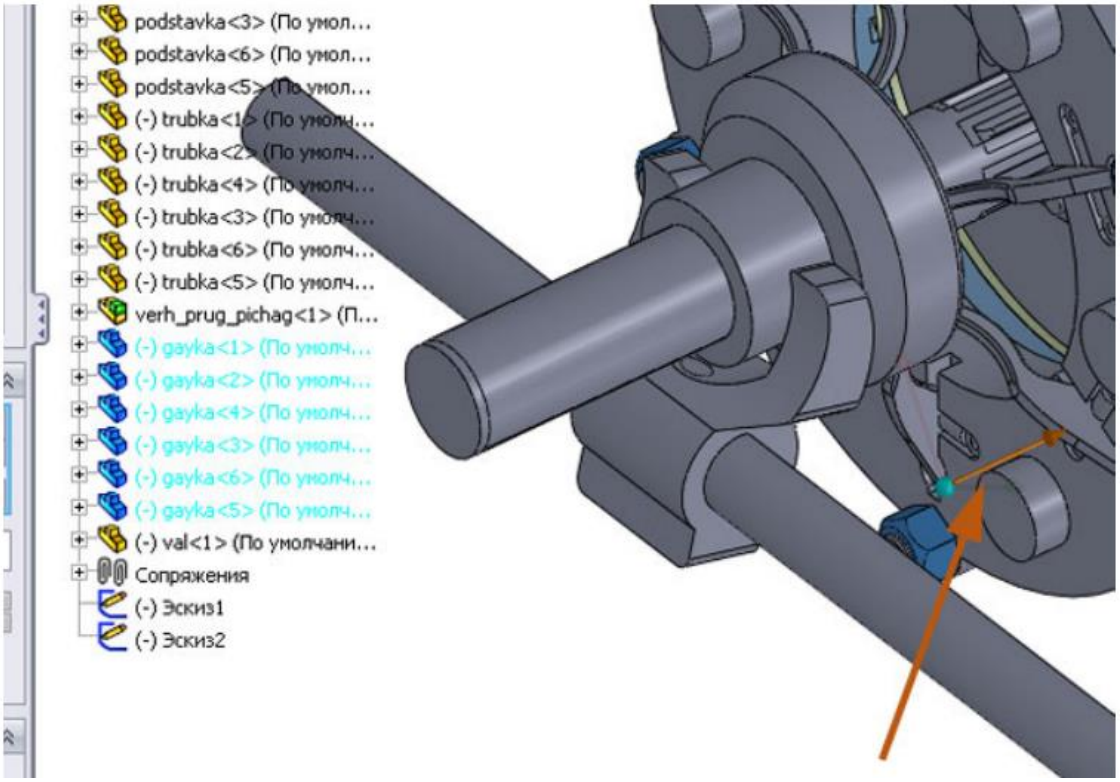


Рисунок 8 – Указание оси и направления перемещения

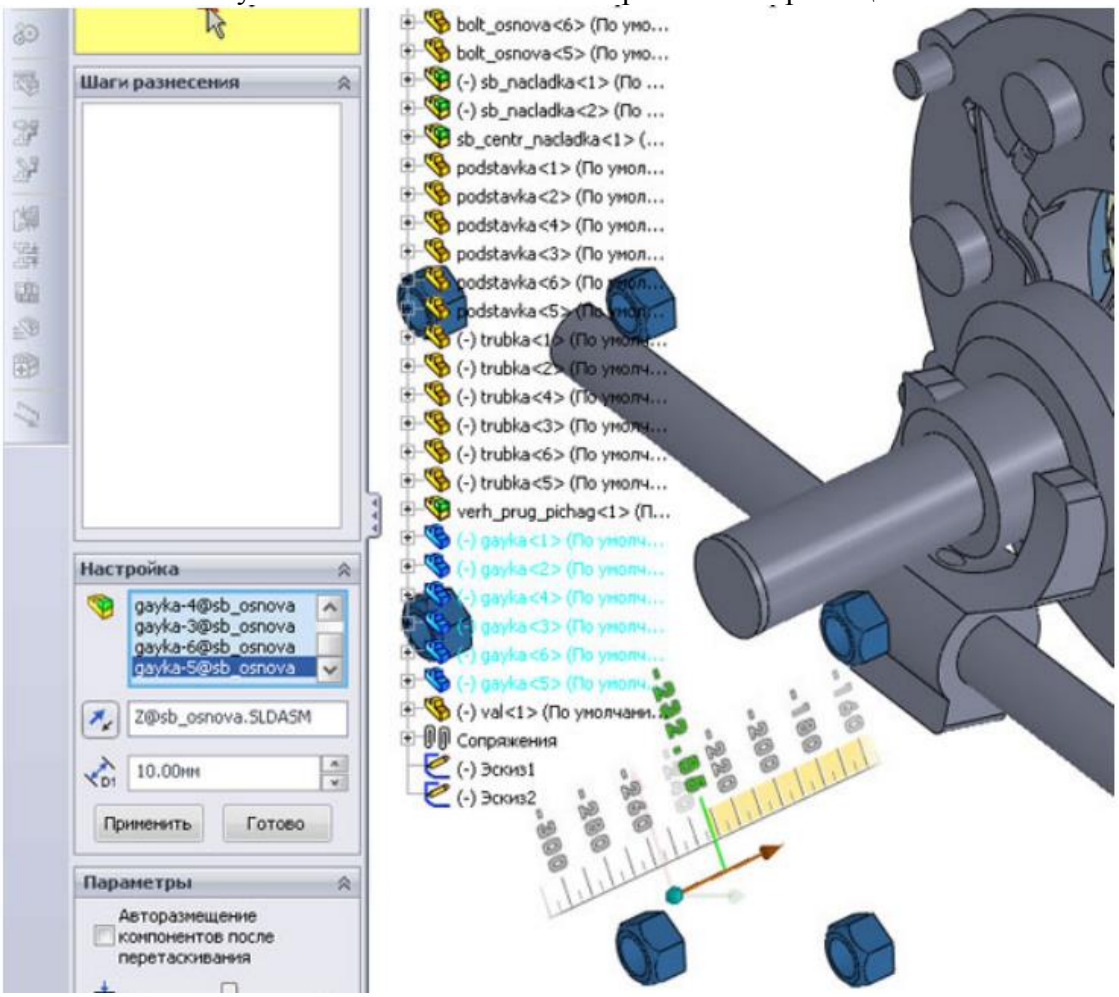


Рисунок 9 – Текущий момент перемещения

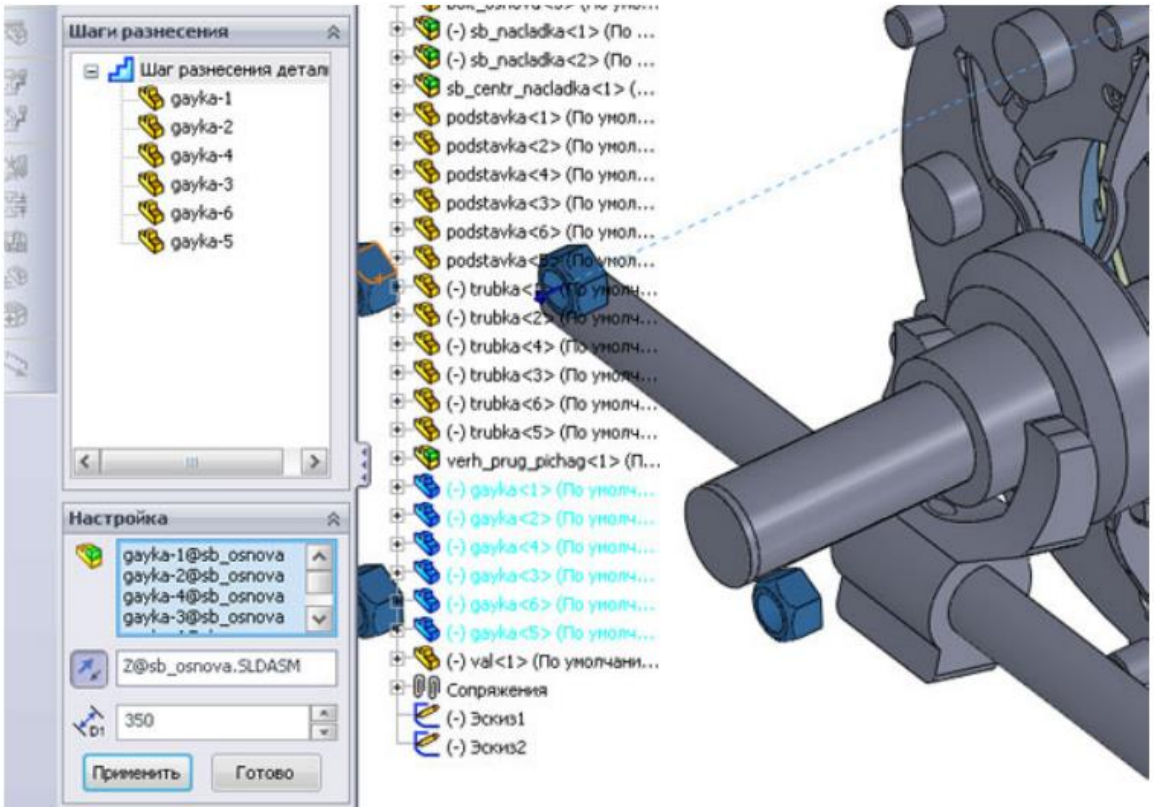


Рисунок 10 – Окончание. Активировать кнопки «Применить» и «Готово»

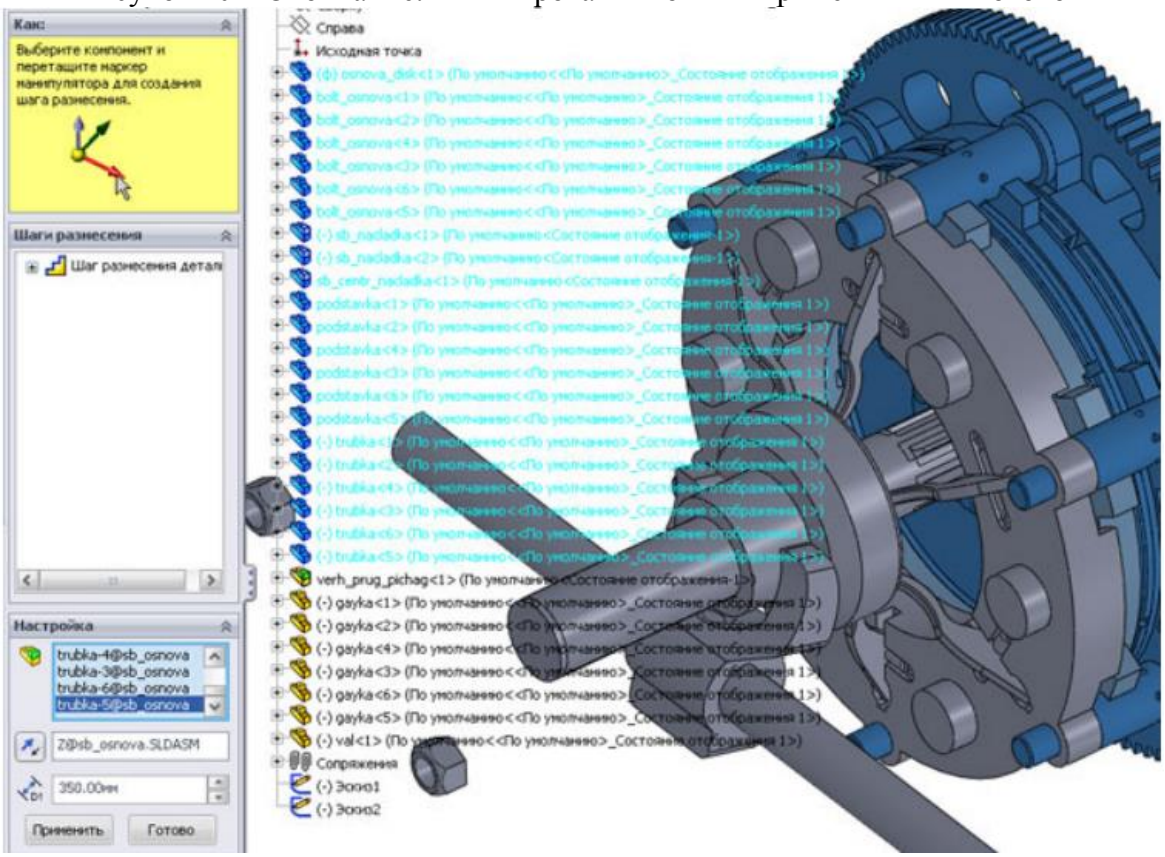


Рисунок 11 – Выделение группы разнородных элементов

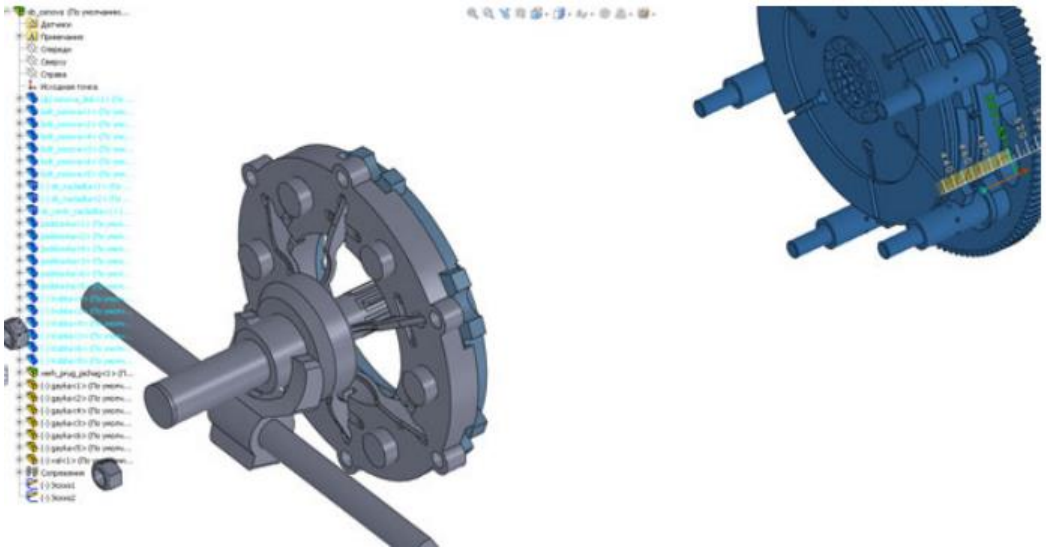


Рисунок 12 – Перемещение группы деталей

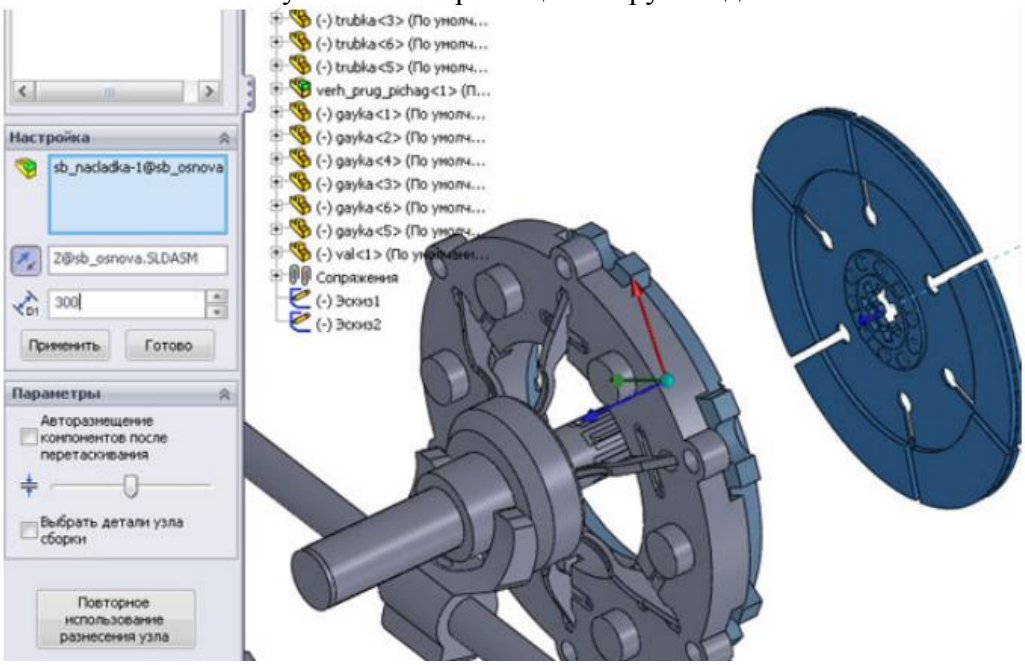


Рисунок 13 – Перемещение первого основного диска сцепления

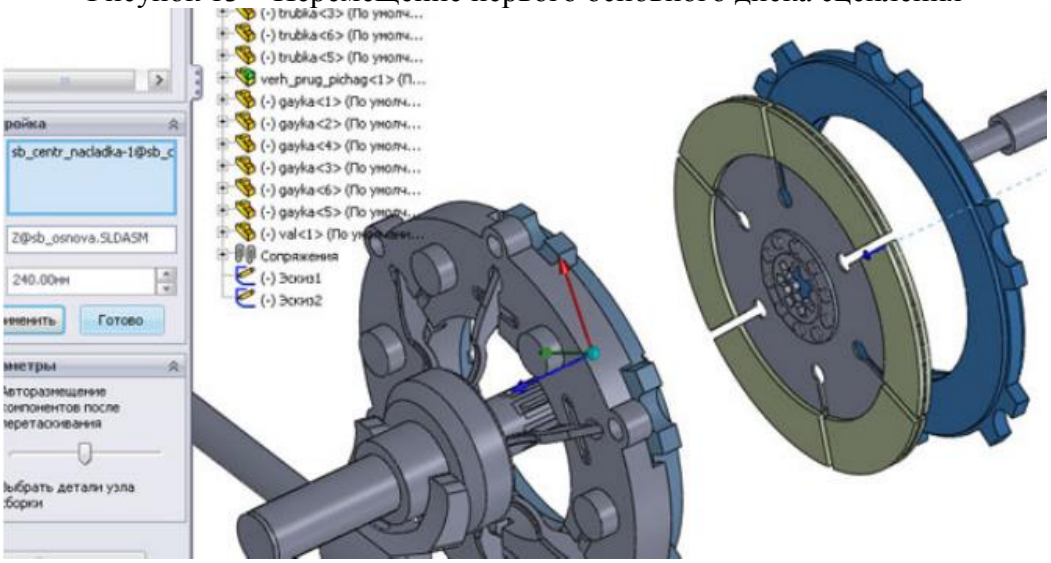


Рисунок 14 – Перемещение промежуточного диска сцепления

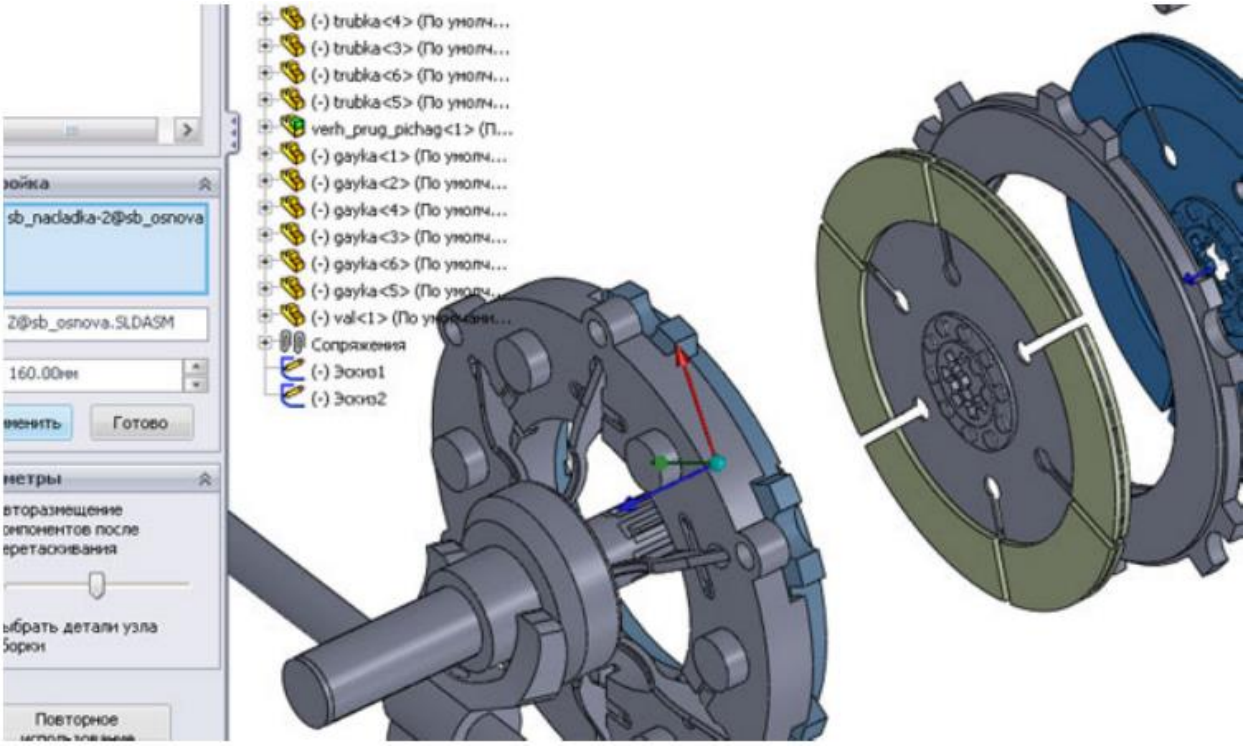


Рисунок 15 – Перемещение первого основного диска сцепления

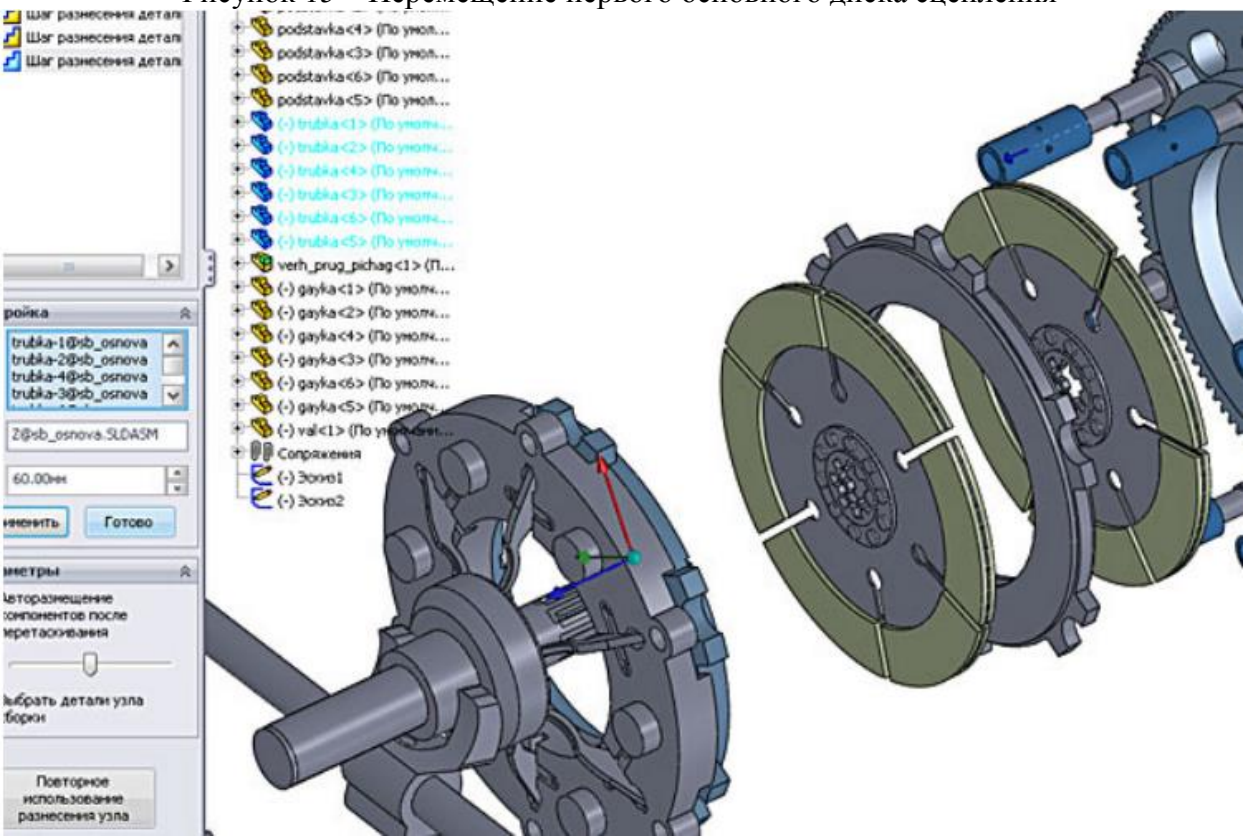


Рисунок 16 – Перемещение опорных патрубков

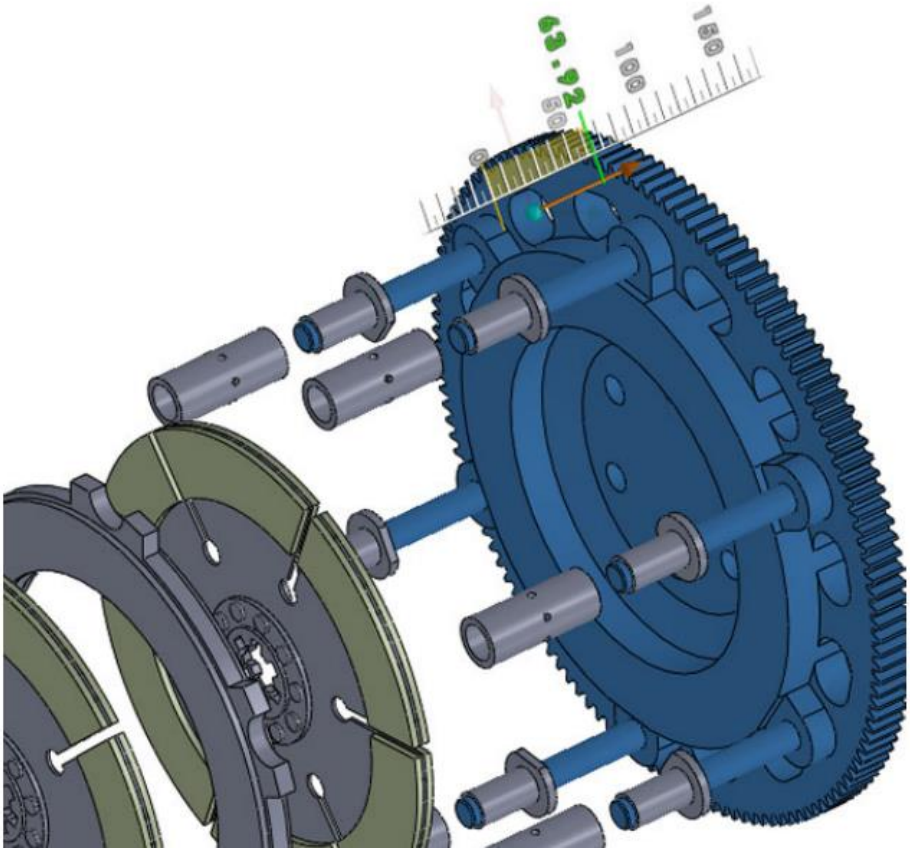


Рисунок 17 – Перемещение маховика с болтами

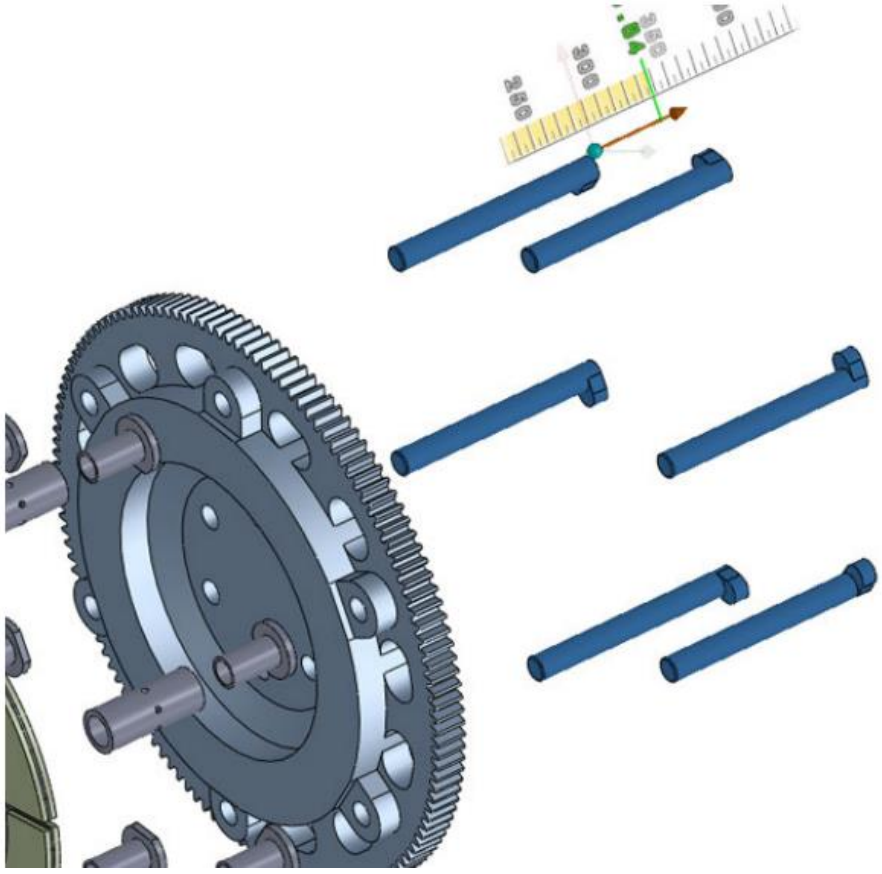


Рисунок 18 – Перемещение болтов

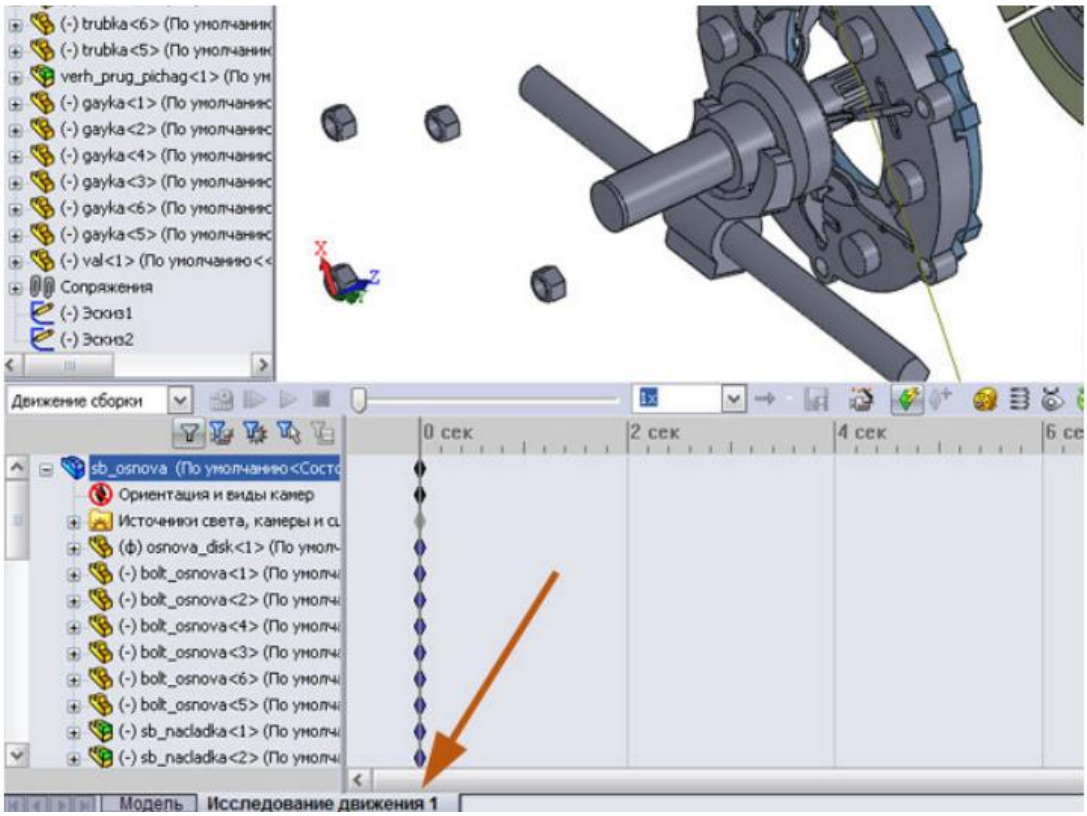


Рисунок 19 – Переход на вкладку «Исследование движения»

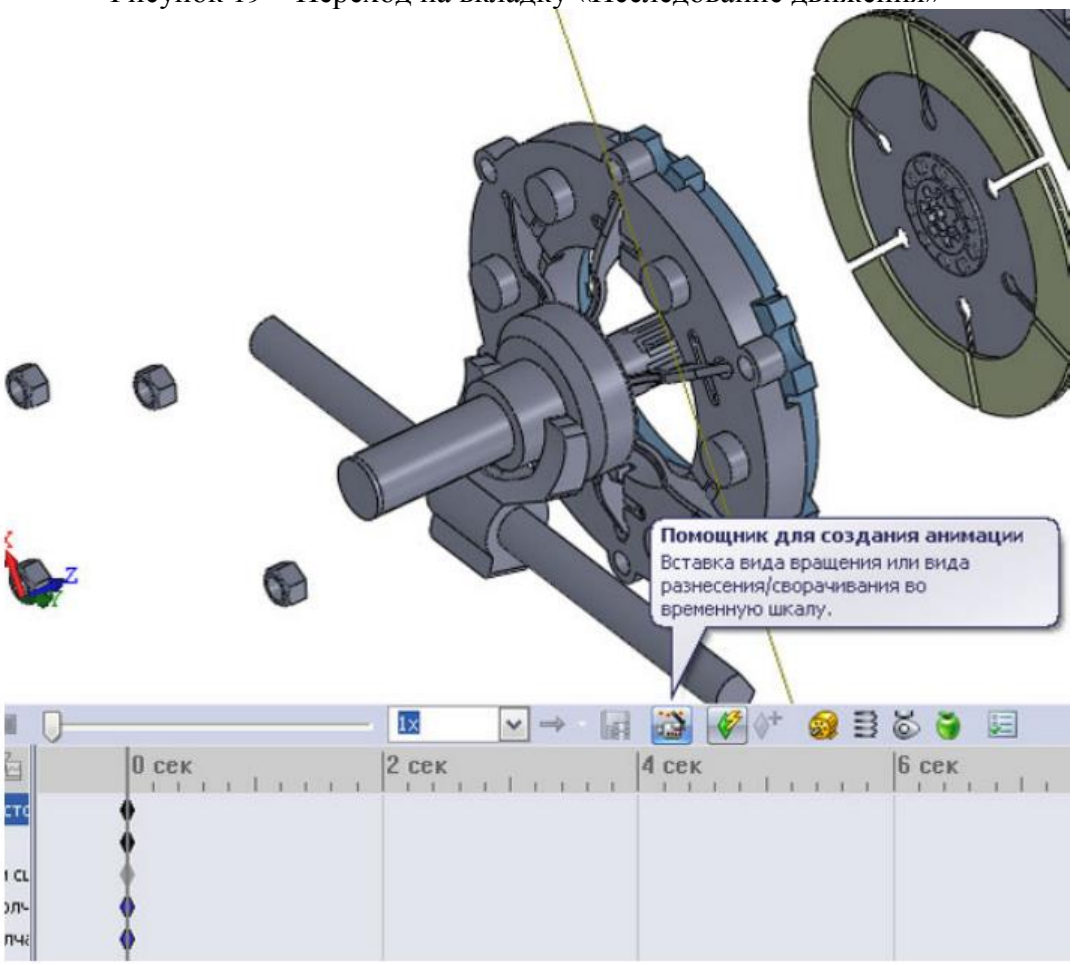


Рисунок 20 – Активация помощника создания анимации

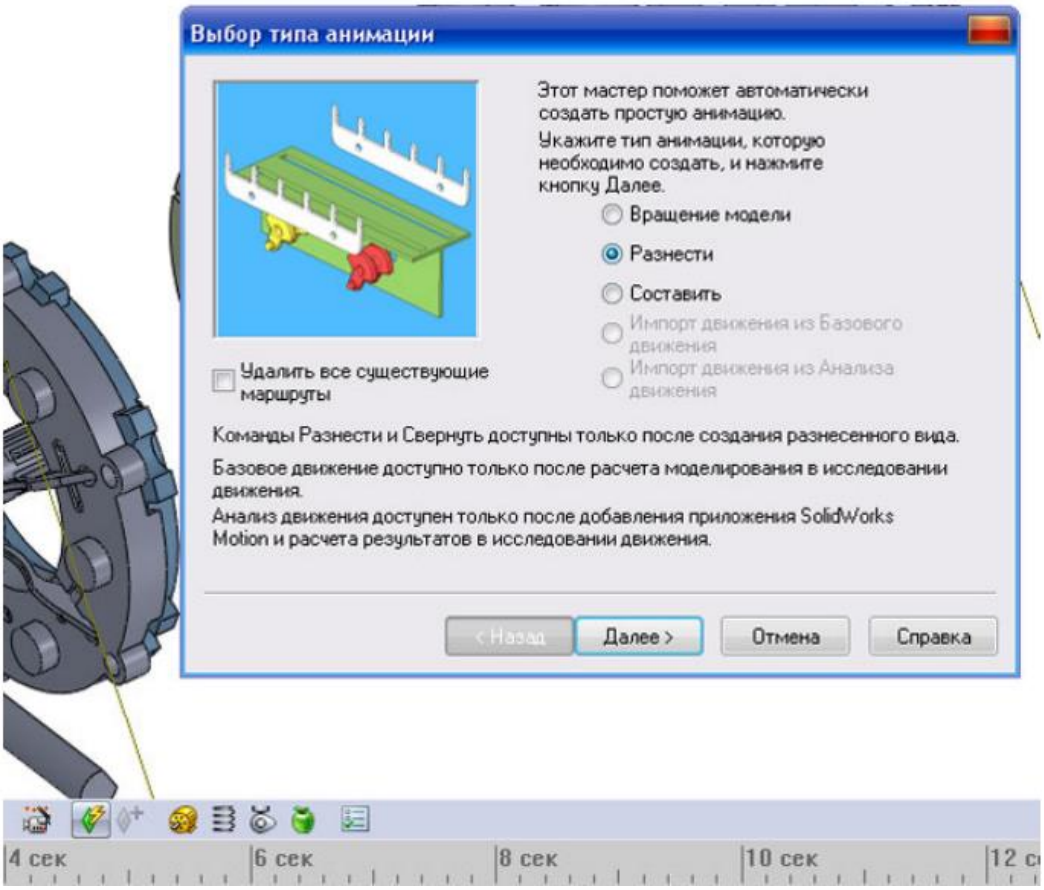


Рисунок 21 – Указание типа анимации

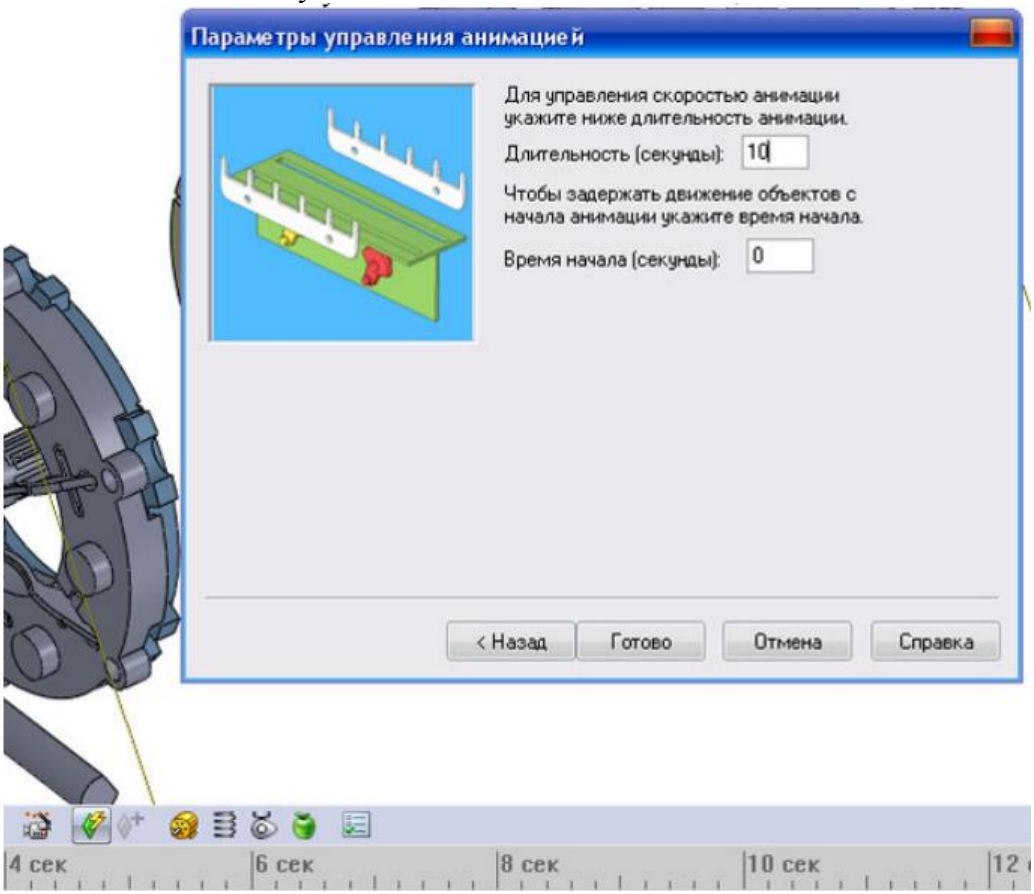


Рисунок 22 – Указание длительности анимации

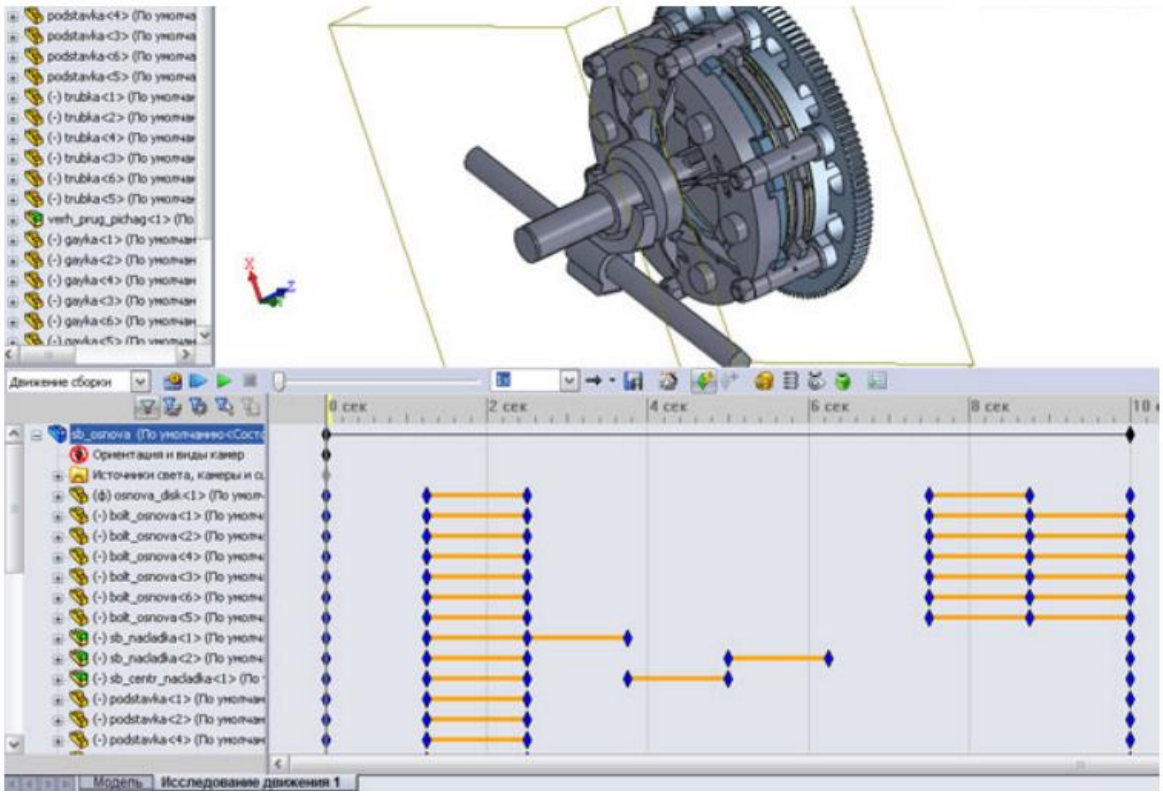


Рисунок 23 – Построение сценария движение элементов сборки на временной линейке

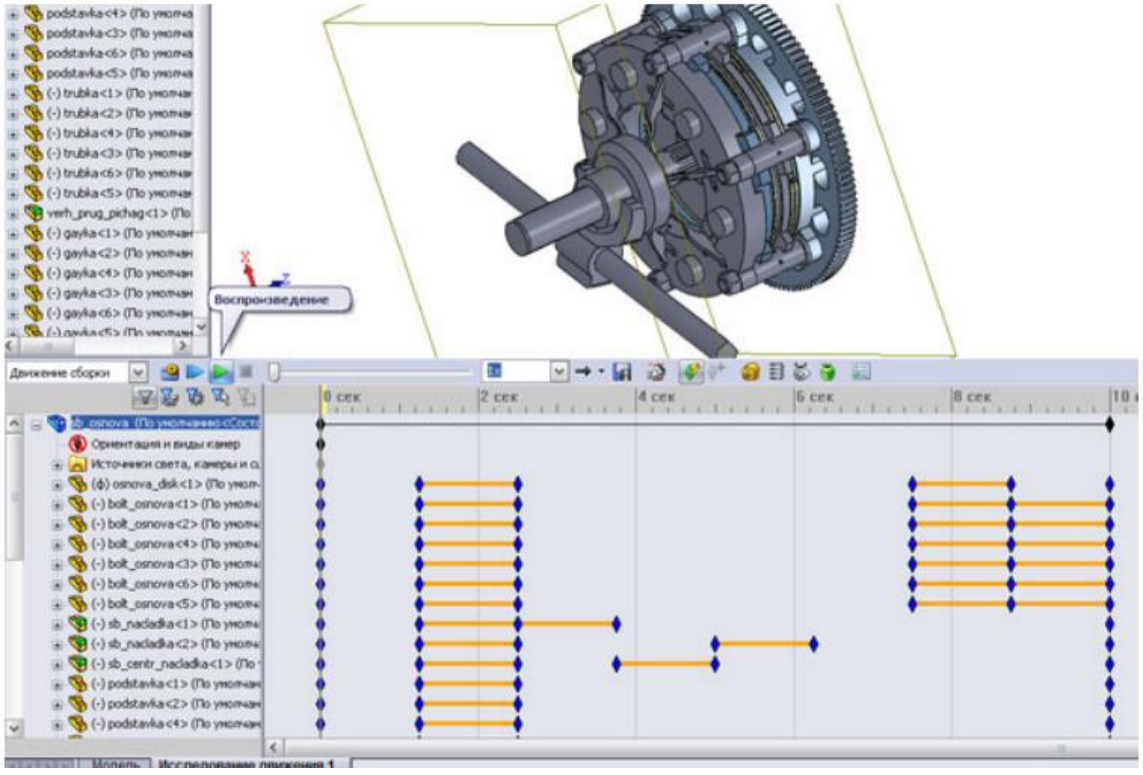


Рисунок 24 – Активация воспроизведения анимации

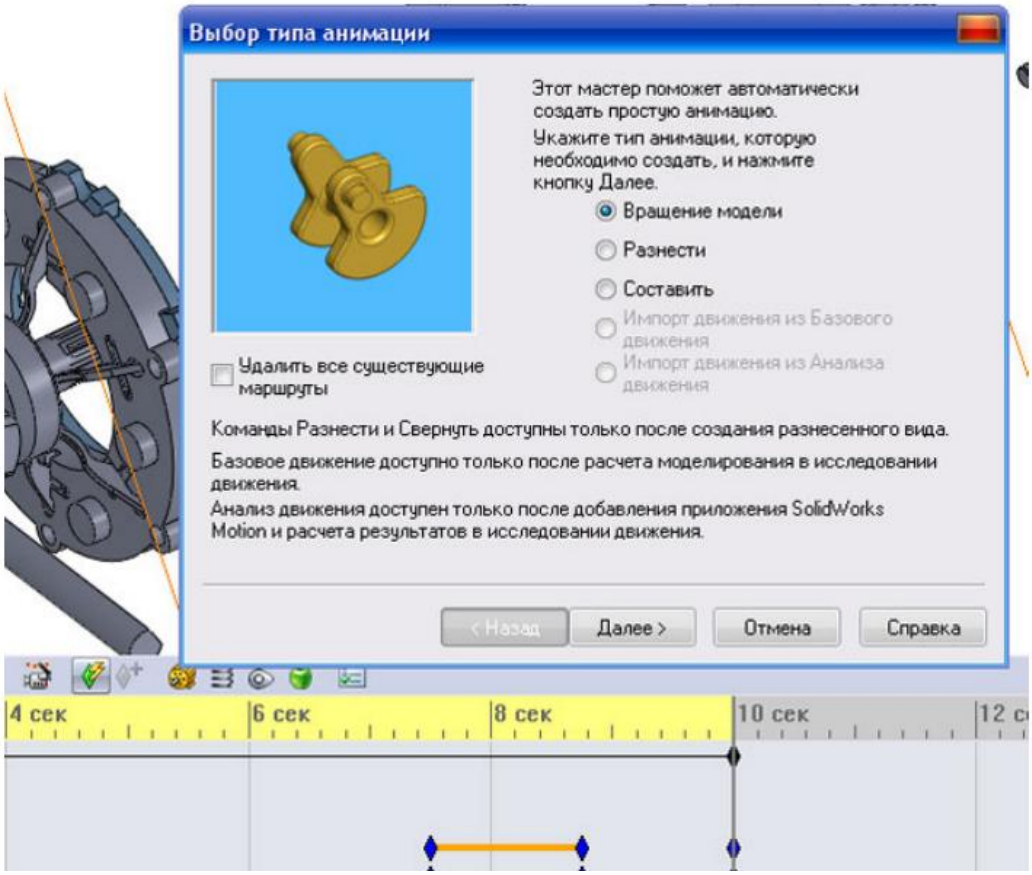


Рисунок 25 – Указание типа анимации – «вращение»

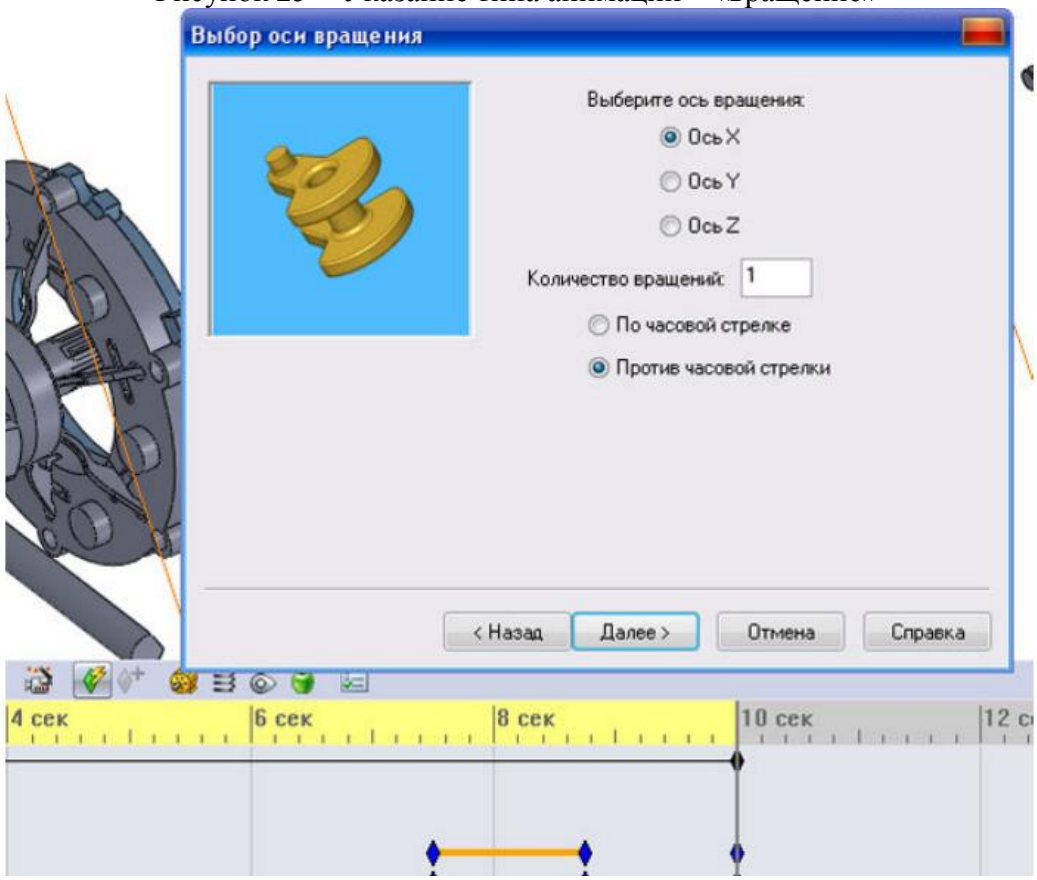


Рисунок 26 – Указание оси вращения

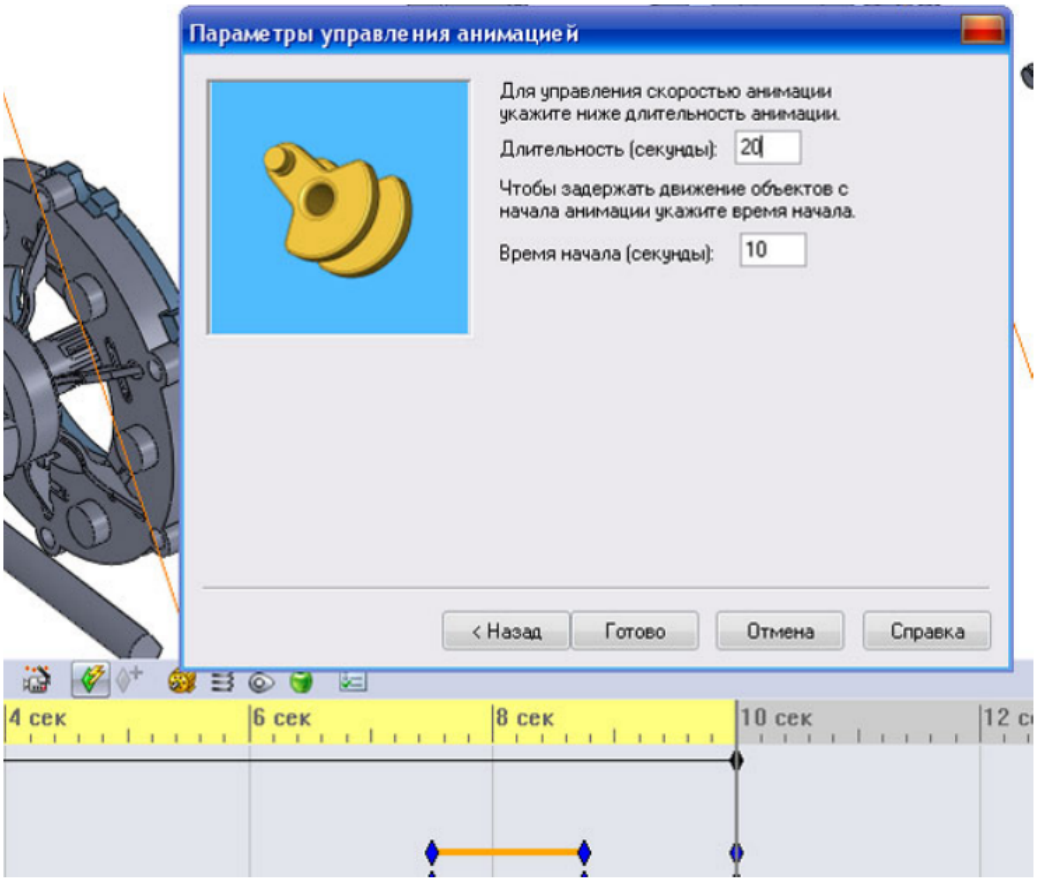


Рисунок 27 – Указание длительности анимации

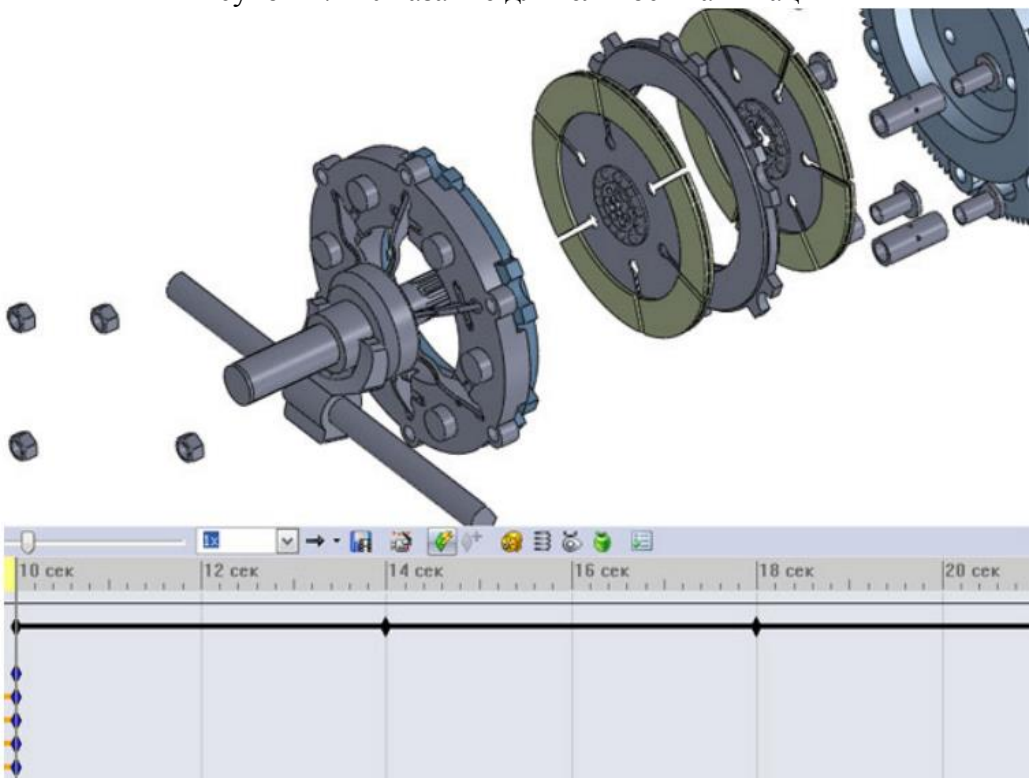


Рисунок 28 – Результат на временной линейке

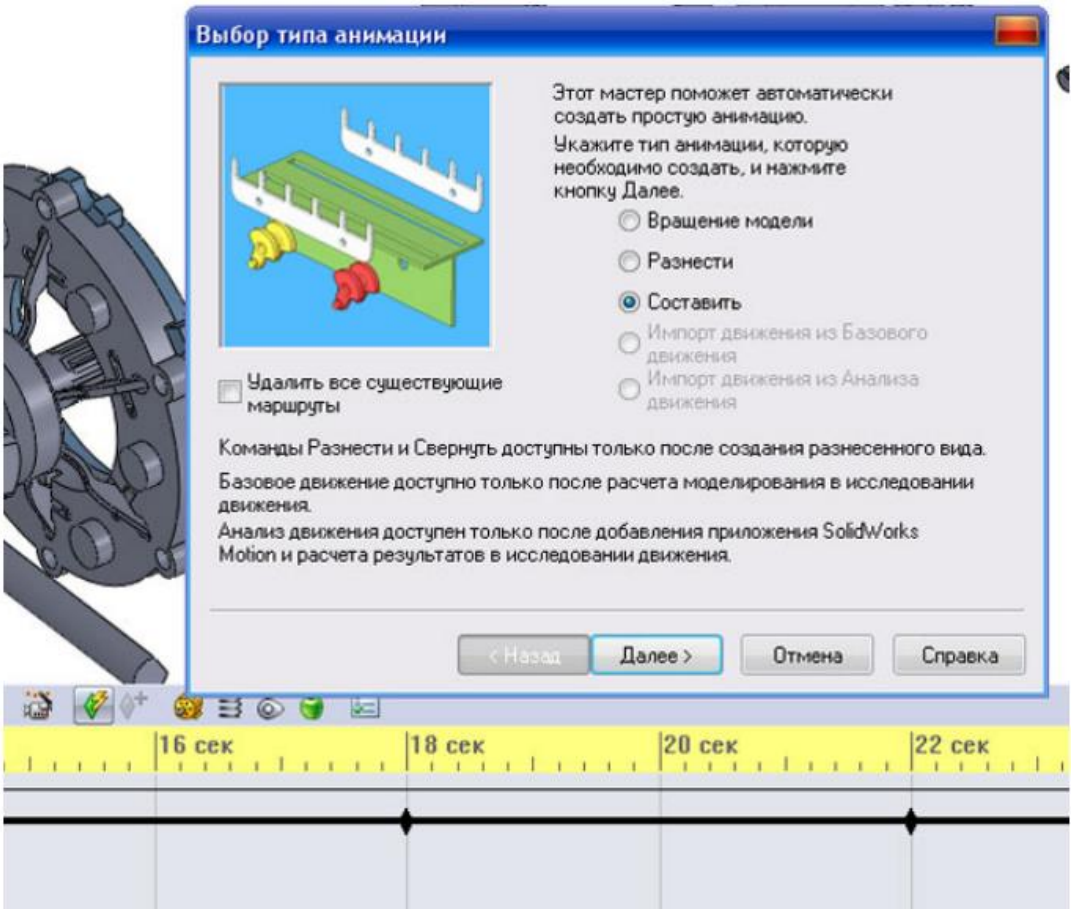


Рисунок 29 – Указание типа анимации

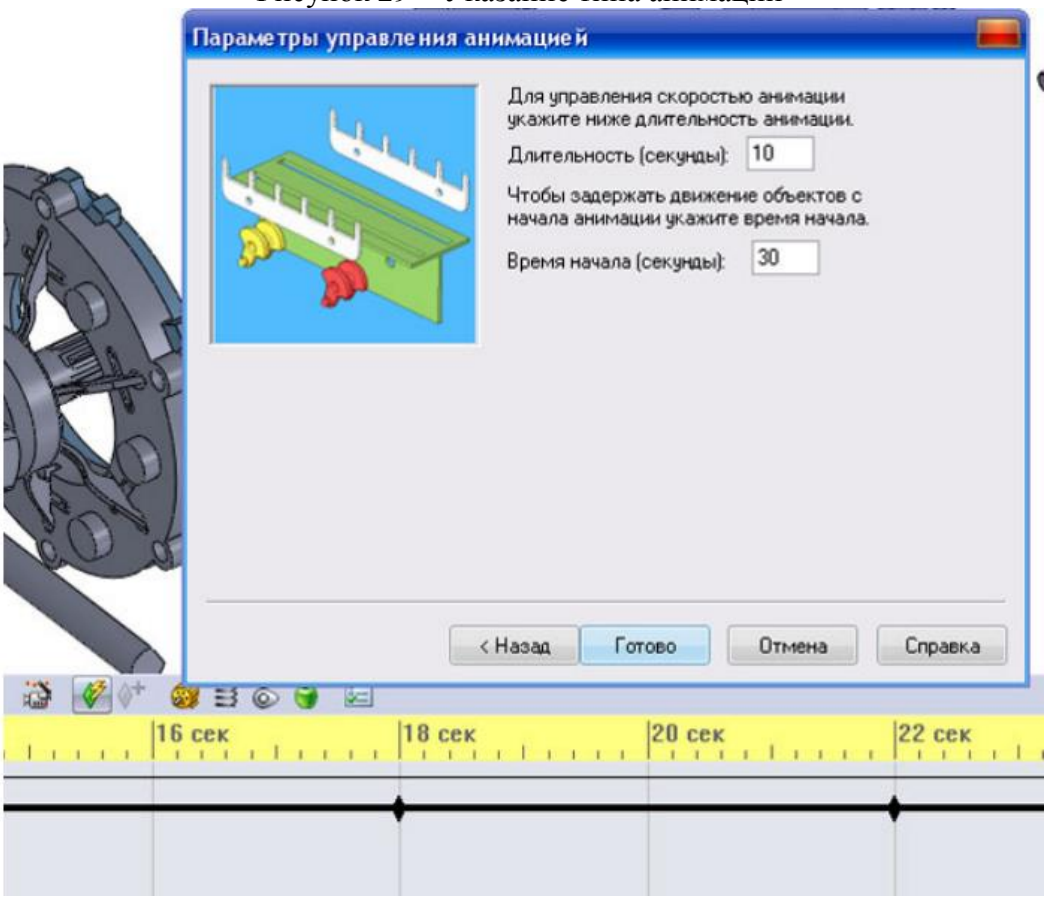


Рисунок 30 – Указание длительности и начала анимации

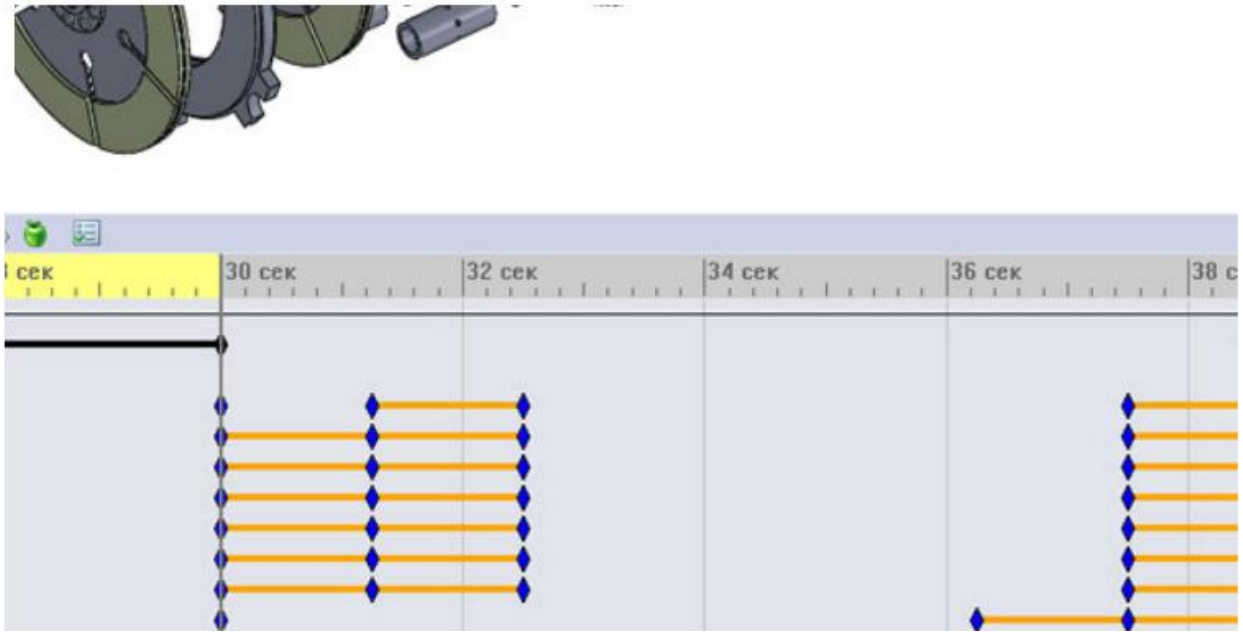


Рисунок 31 – Сценарий сборки на временной линейке

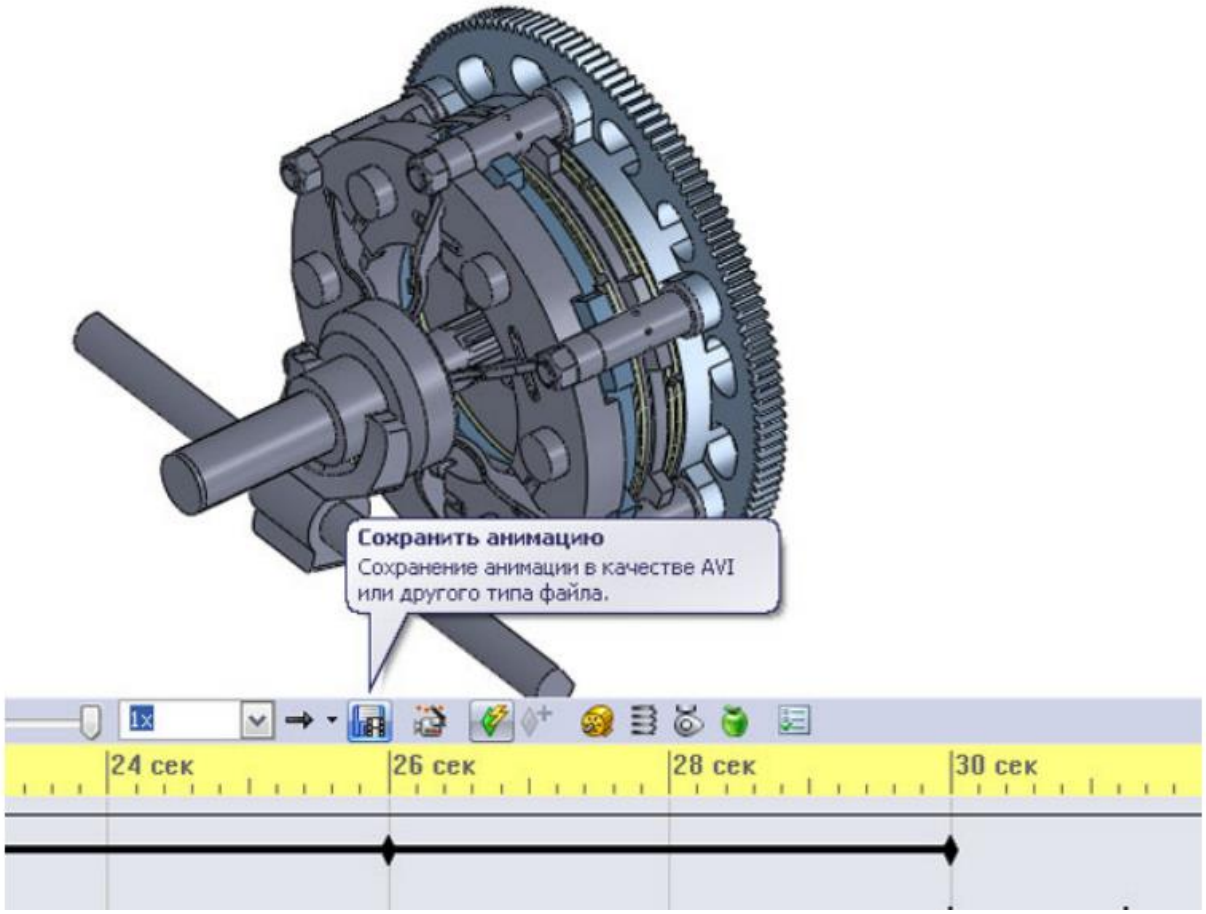


Рисунок 32 – Активация сохранения анимации в файл

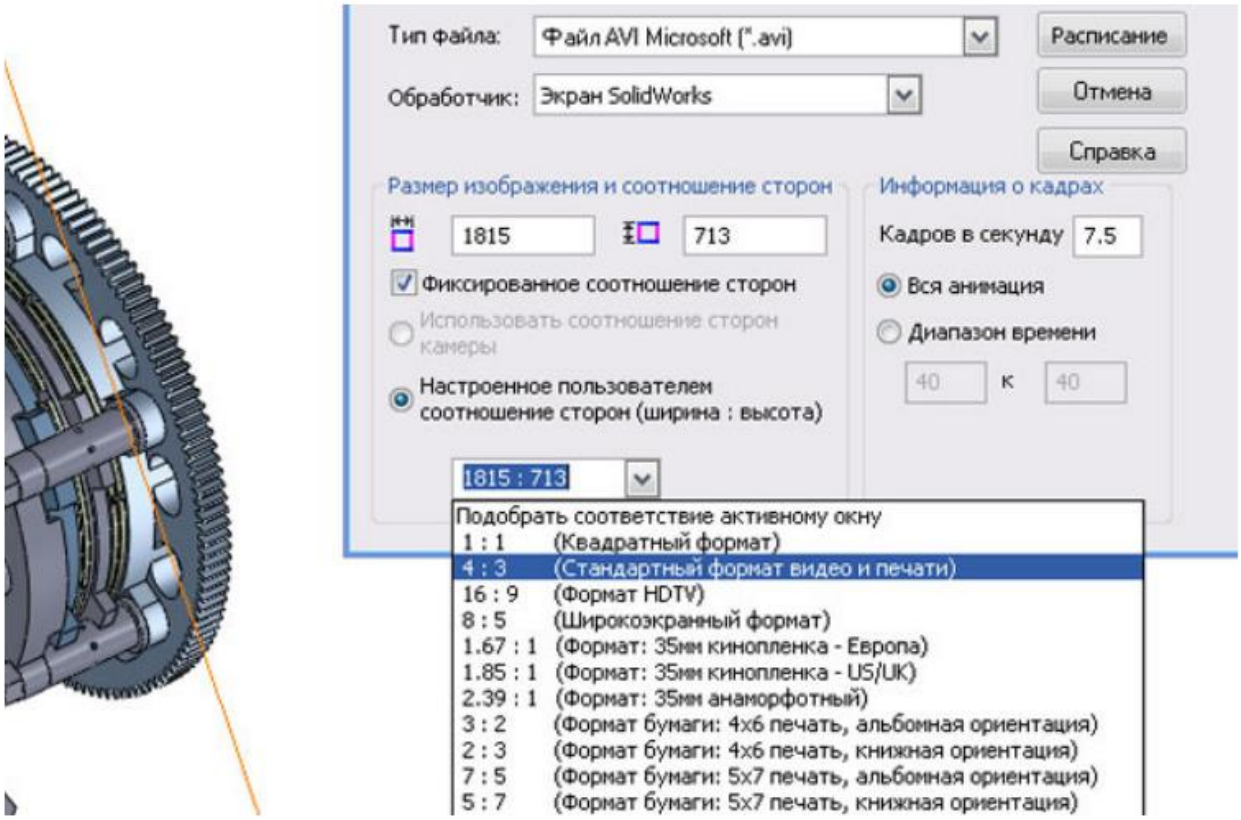


Рисунок 33 – Настройка формата кадра

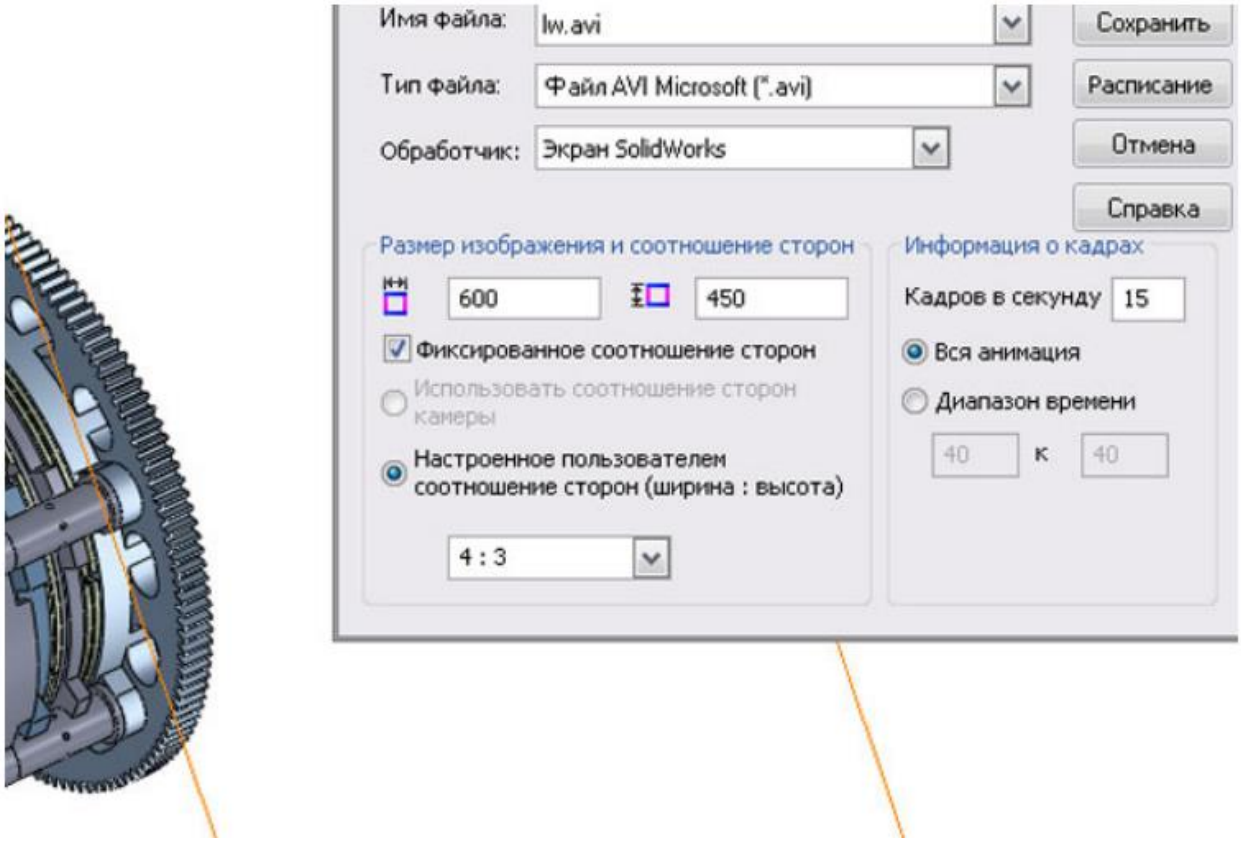


Рисунок 34 – Настройка размеров кадра и частоты записи

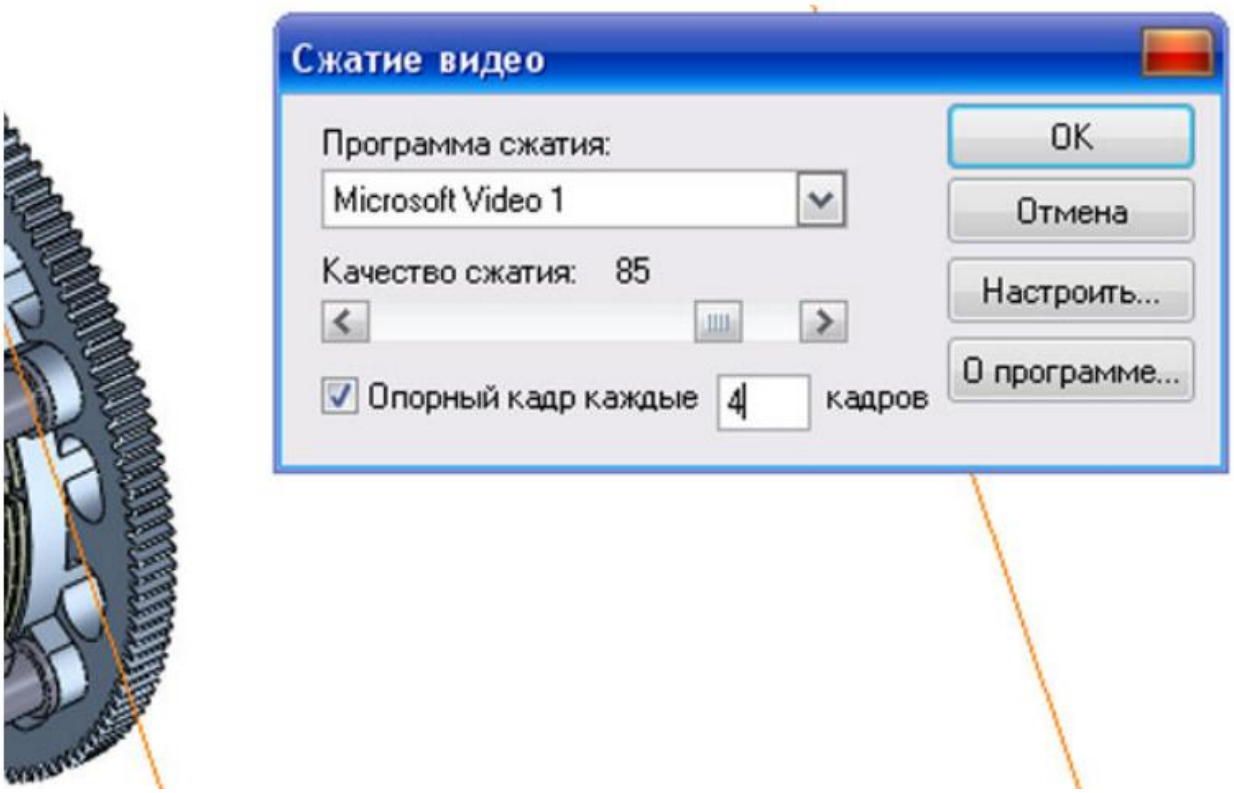


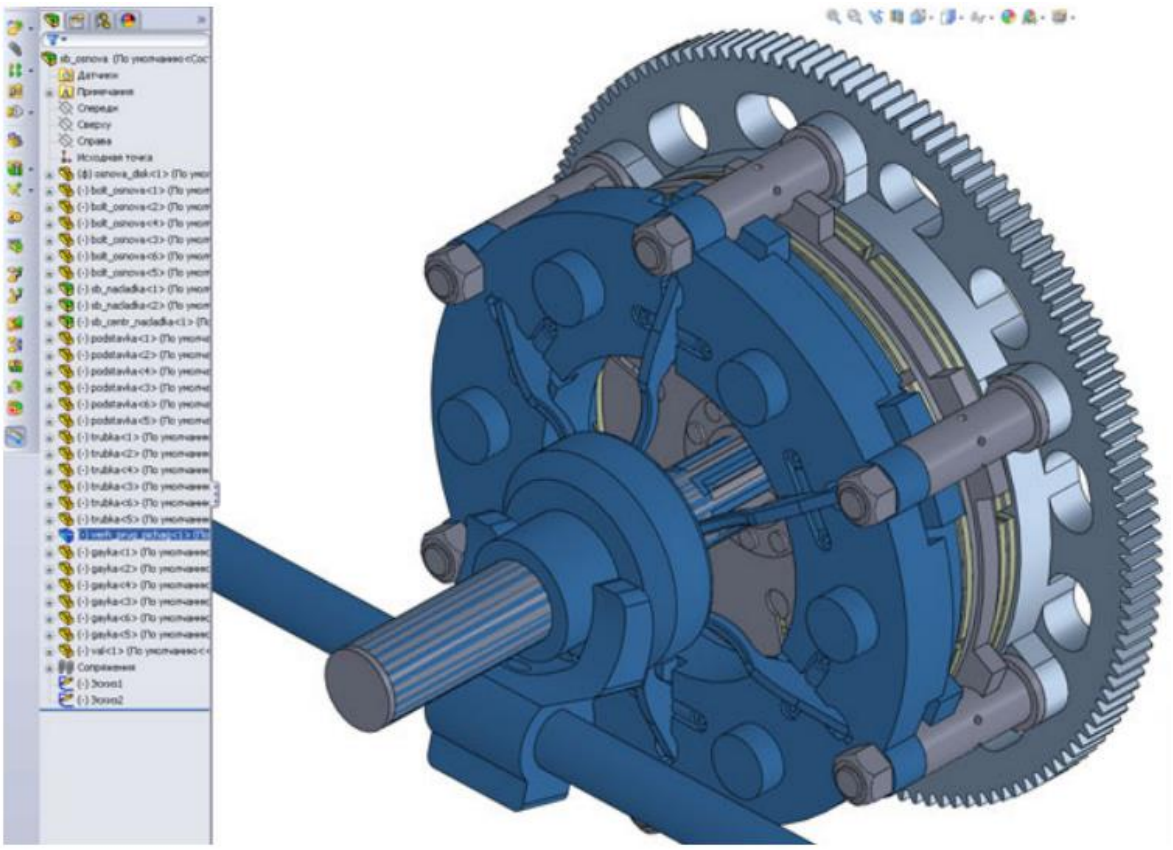
Рисунок 35 – Настройка формата сжатия и качества записи кадров

Выводы:

1. Построена сборка сцепления спортивного автомобиля.
2. Сформирован сценарий разнесения, вращения и составления частей сборки сцепления.
3. Реализована анимация и проведена запись результатов в файл.

ЗАДАНИЕ

1. Осуществить сборку модели, сохранить сборку в файле с именем **sceplenie**;
2. Скопировать проект сборки в папку **copy_sceplenie**, для имен файлов использовать префикс **_copy_** ;
3. Для копии сцепления выполнить «разнесение» деталей сборки **verh_prug_pichag**, показанной на рисунке 36, сохранить сборку;
4. Сформировать вид с «разнесением» в аниматоре.



5. Рисунок 36 – Сборка «verh_prug_pichag.sldasm»

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Порядок построения сборки конструкции.
2. Основные типы сопряжений, доступные в среде SolidWorks.
3. Типы объектов сопряжения.
4. Порядок работы с инструментом разнесения частей сборки.
5. Возможности аниматора.
6. Типы анимации.
7. Порядок настройки параметров записи анимации.
8. С какой целью осуществляют копирование проекта в среде SolidWorks

ЛИТЕРАТУРА

1. Алямовский, А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. - СПб.: БХВ-Петербург, 2008. - 1040 с.

2. Алямовский, А.А. SolidWorks / COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. - М.: ДМК Пресс, 2004. - 432 с.

3. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004. - СПб.: Питер, 2005. - 768 с.

4. Прохоренко В.П. SolidWorks. Практическое руководство. - М.: ООО "Бином-Пресс", 2004. - 448 с.

5. Справочная система SolidWorks.

6. РАСЧЁТ НДС И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ В МОДУЛЕ SIMULATIONXPRESS

Цель работы:
приобретение навыков моделирования сборок конструкций и процессов их функционирования, разборки и сборки в системе SolidWorks.

СПРАВКА

SolidWorks SimulationXpress является простым в использовании новым инструментом анализа напряжений для пользователей SolidWorks.

Интерфейс помощника SimulationXpress содержит элементы полного интерфейса моделирования, которые обеспечивают настройку, ограничений, нагрузки, материала, процесса моделирования и просмотреть результаты, провести оптимизацию параметров детали.

Точность результатов зависит от креплений, нагрузок и свойств материала. Чтобы получить надежные результаты, указанные свойства материала должны точно представлять материал детали, а ограничения и нагрузки должны точно представлять условия эксплуатации детали.

SimulationXpress поддерживает анализ отдельного твердого тела. Не поддерживаются сборки, многотельные детали или тела поверхности.

Работа в SimulationXpress осуществляется с помощью мастера-помощника.

ПРИМЕР

Постановка задачи
Исследуется элемент упругого узла для подвижных узлов автомобиля. Модель представлена на рисунке 1.
Необходимо:

- оценить прочностные свойства элементов;
- оптимизировать толщину упругих фигурных мембран.

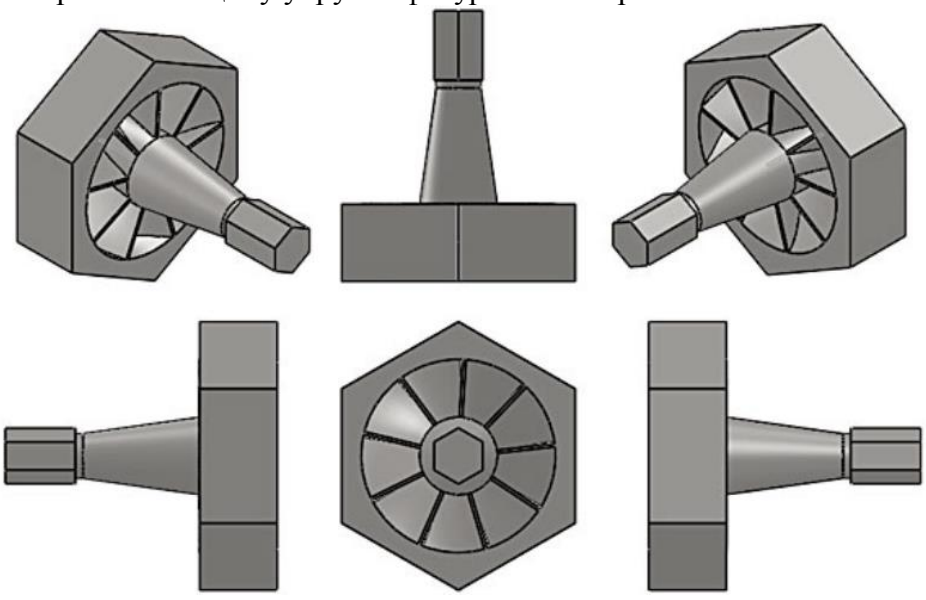


Рисунок 1 – Исследуемая деталь

РЕАЛИЗАЦИЯ:
Последовательность исследования показана на рисунках 2…14.

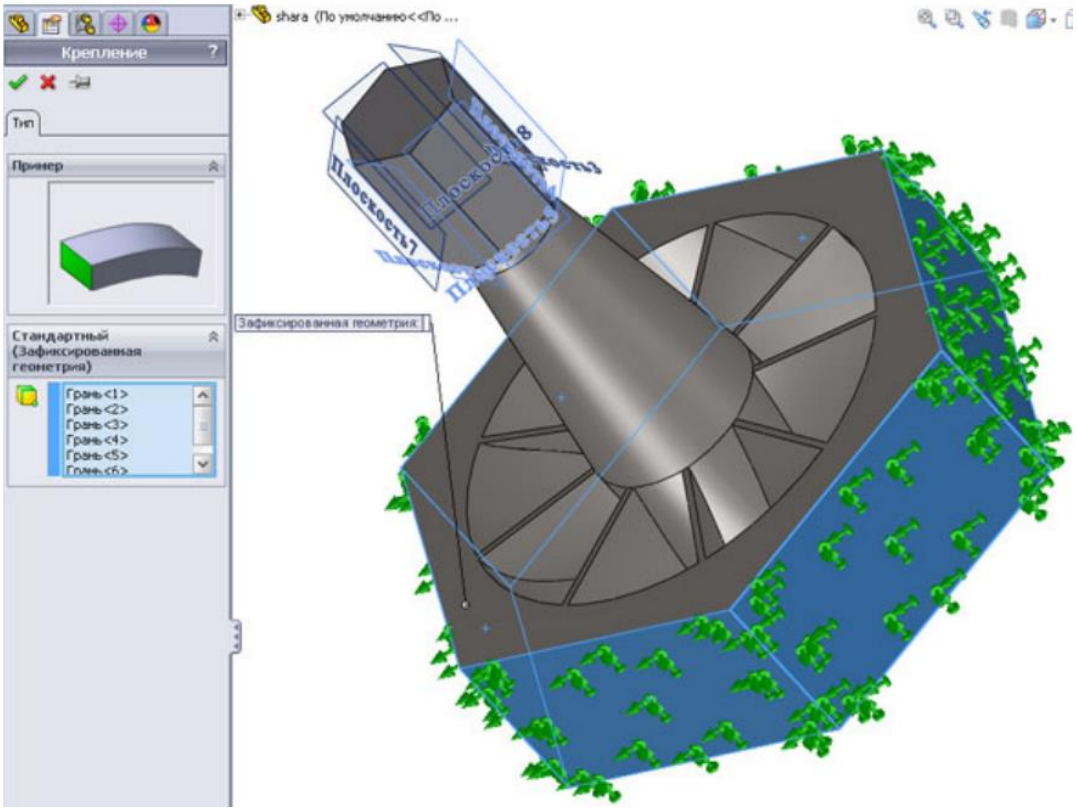


Рисунок 2 – Назначение условий крепления

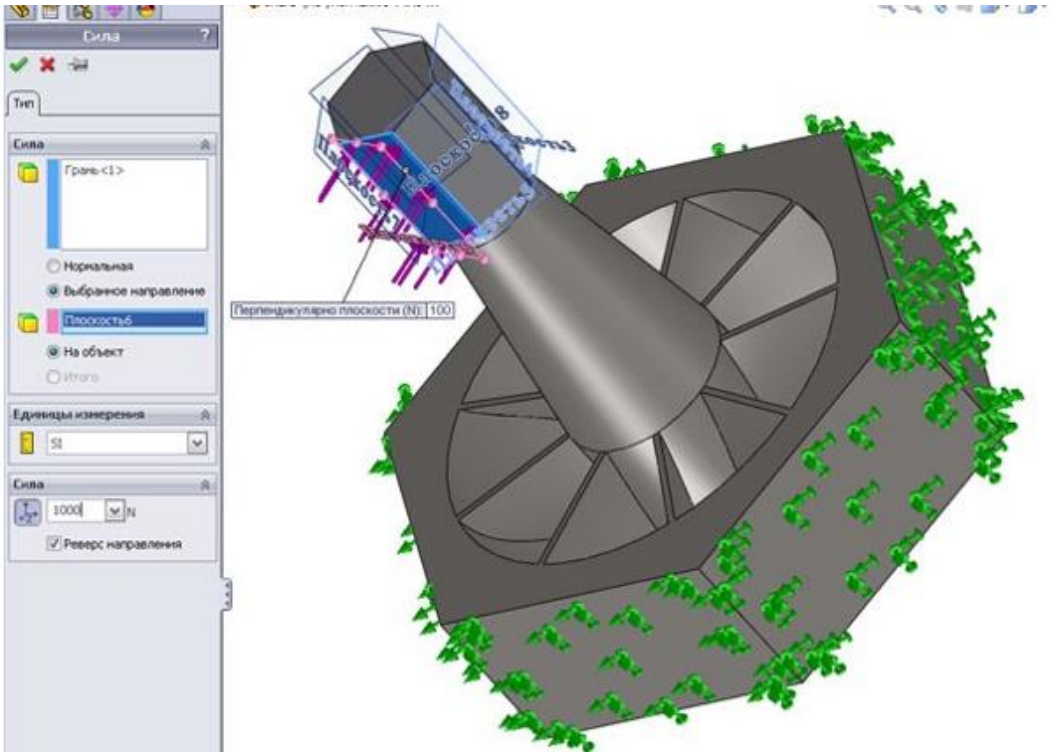


Рисунок 3 – Назначение типа, величины и способа приложения нагрузки

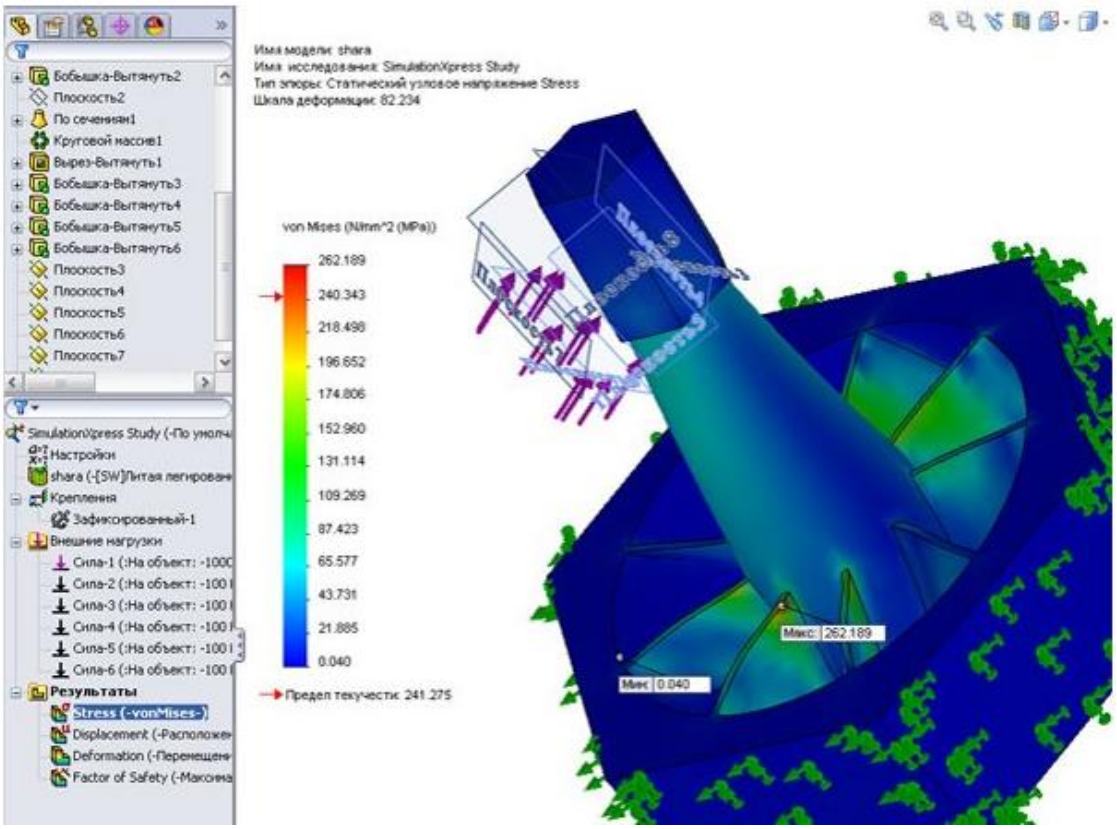


Рисунок 4 – Просмотр результата. Статические узловые напряжения

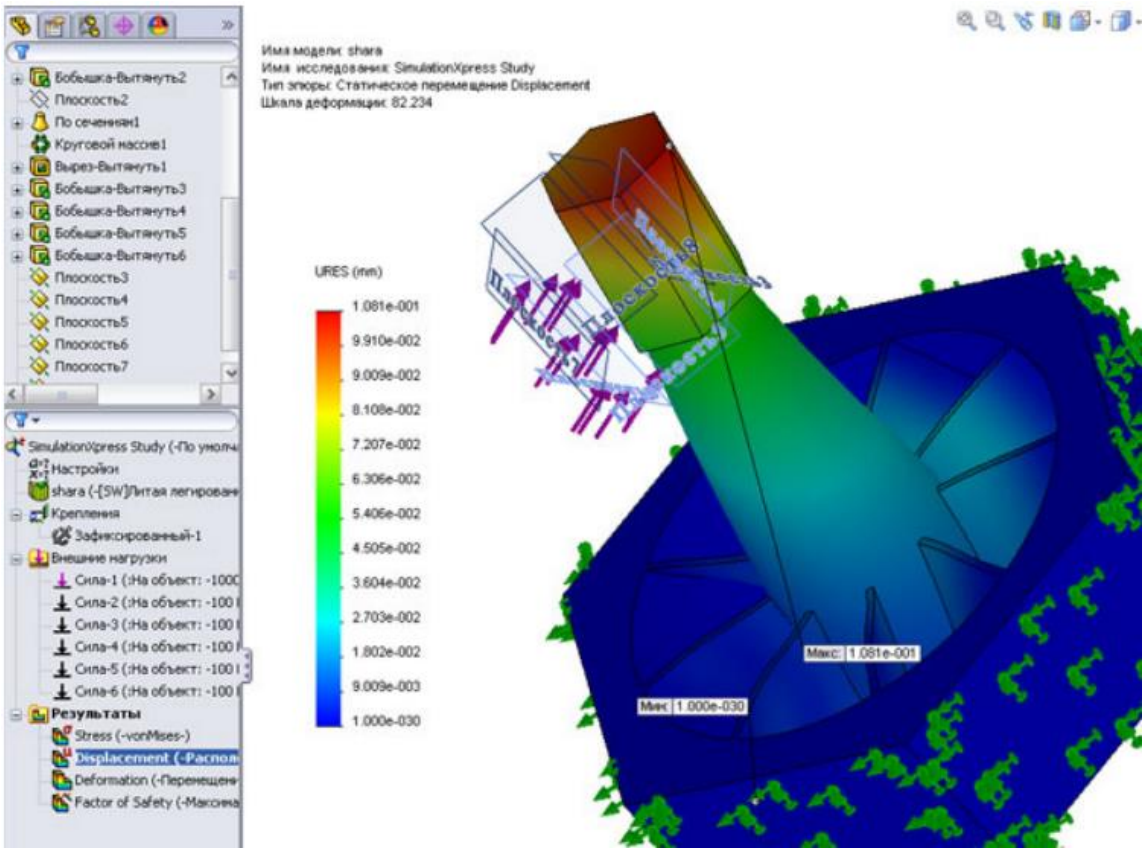


Рисунок 5 – Просмотр результата. Статические перемещения

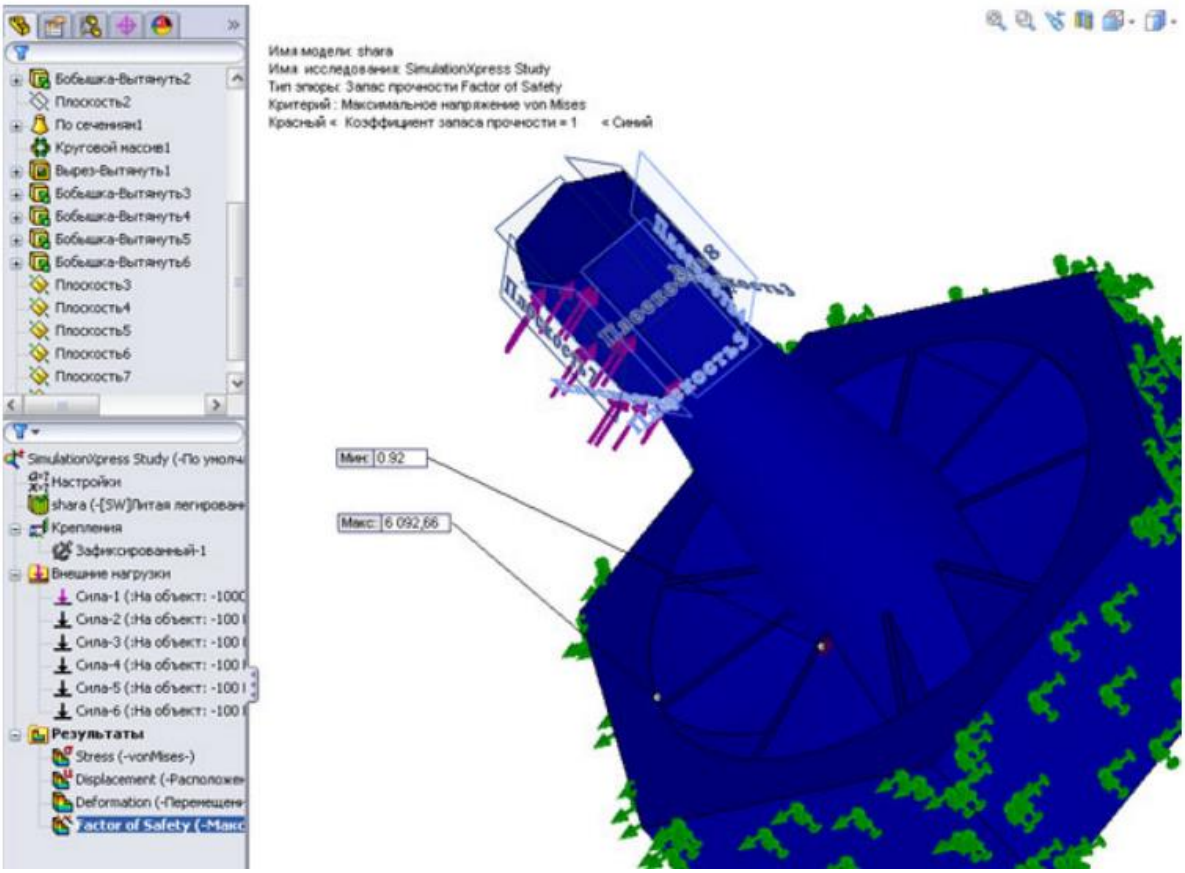


Рисунок 6 – Просмотр результата. Коэффициент запаса прочности

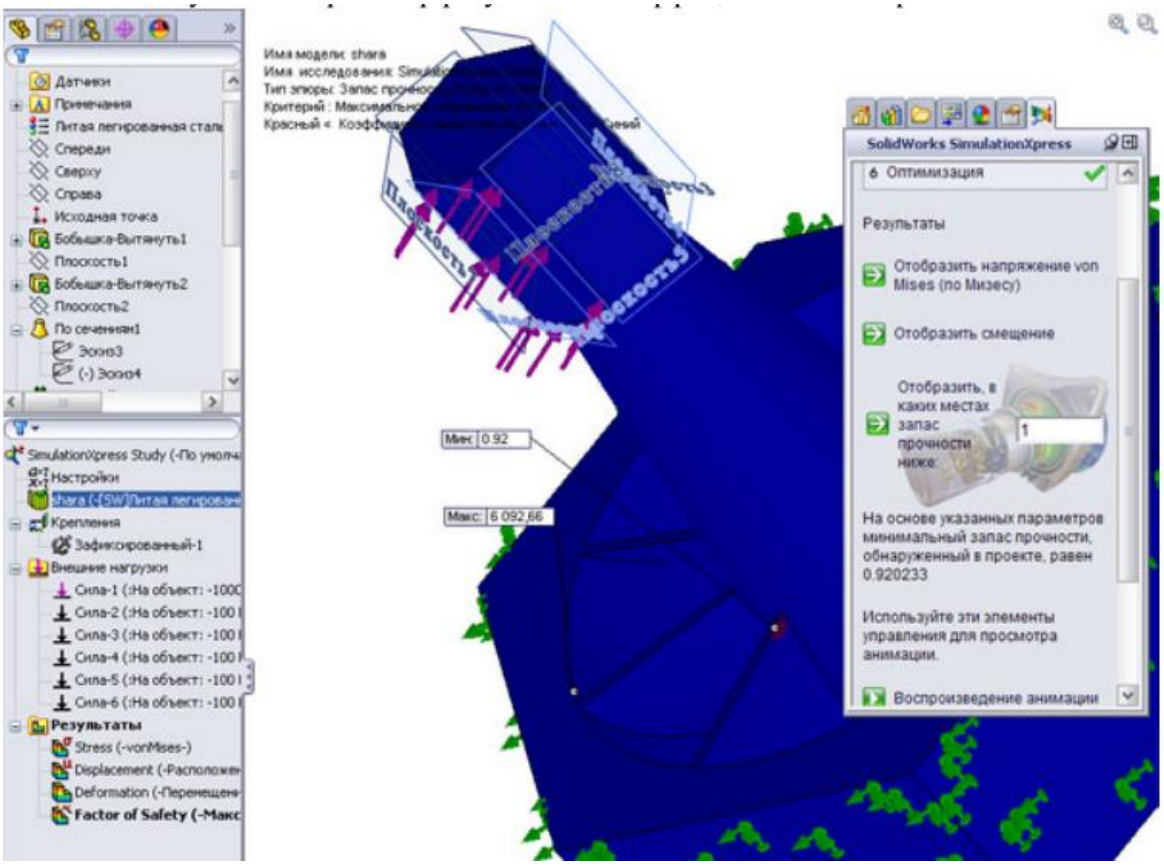


Рисунок 7 – Переход к оптимизации параметров детали

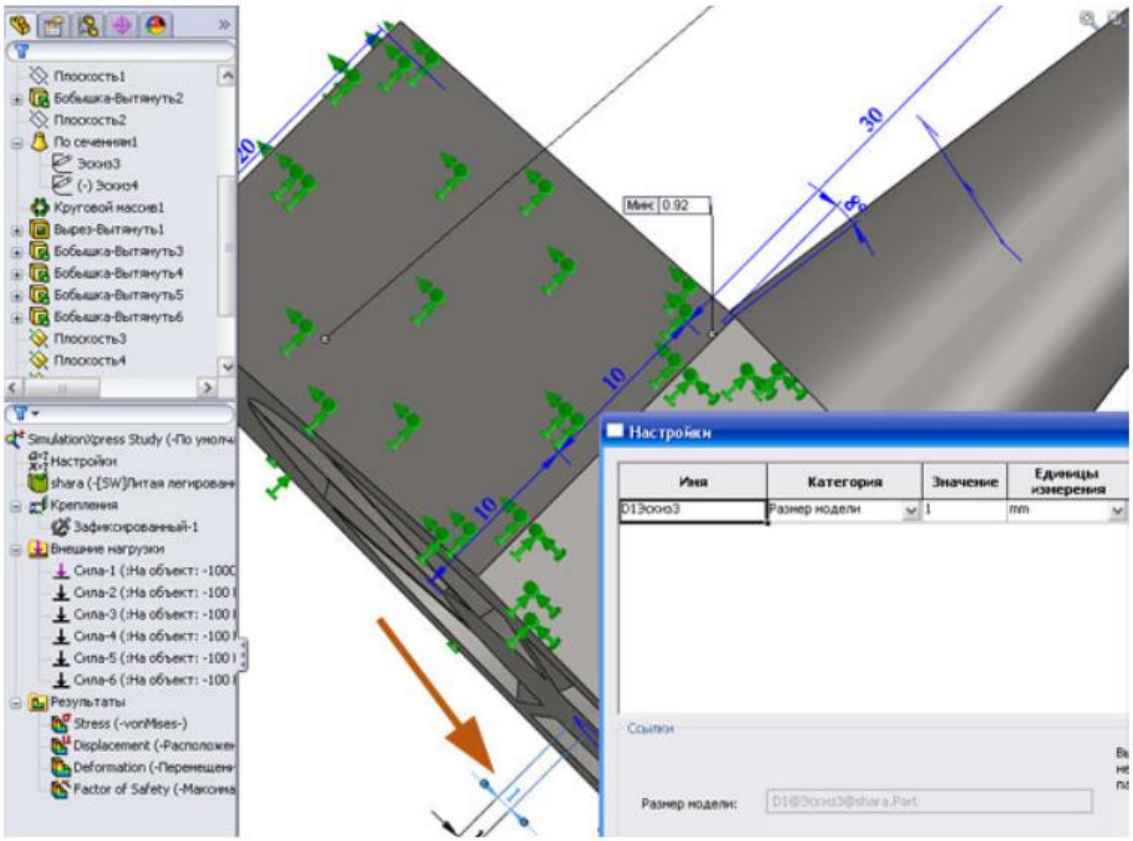


Рисунок 8 – Указание оптимизируемого размера

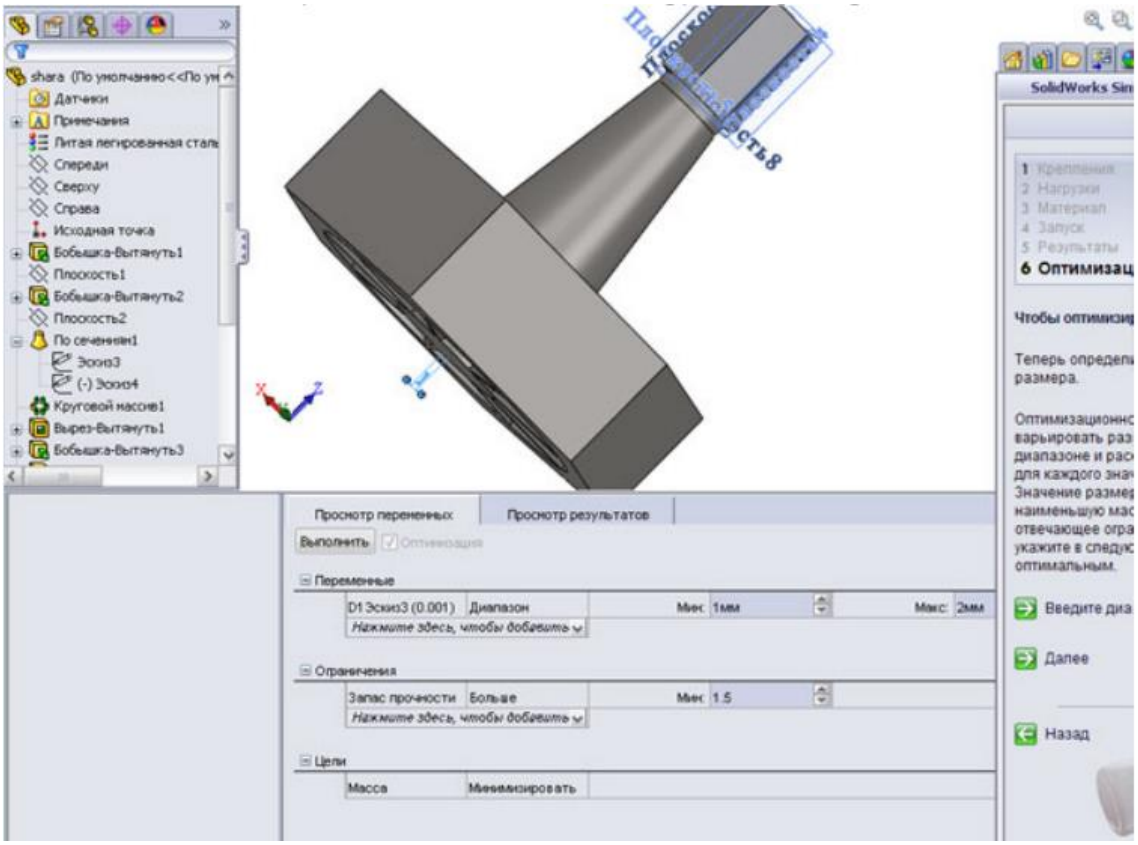


Рисунок 9 – Указание интервала варьирования параметра, ограничений и цели

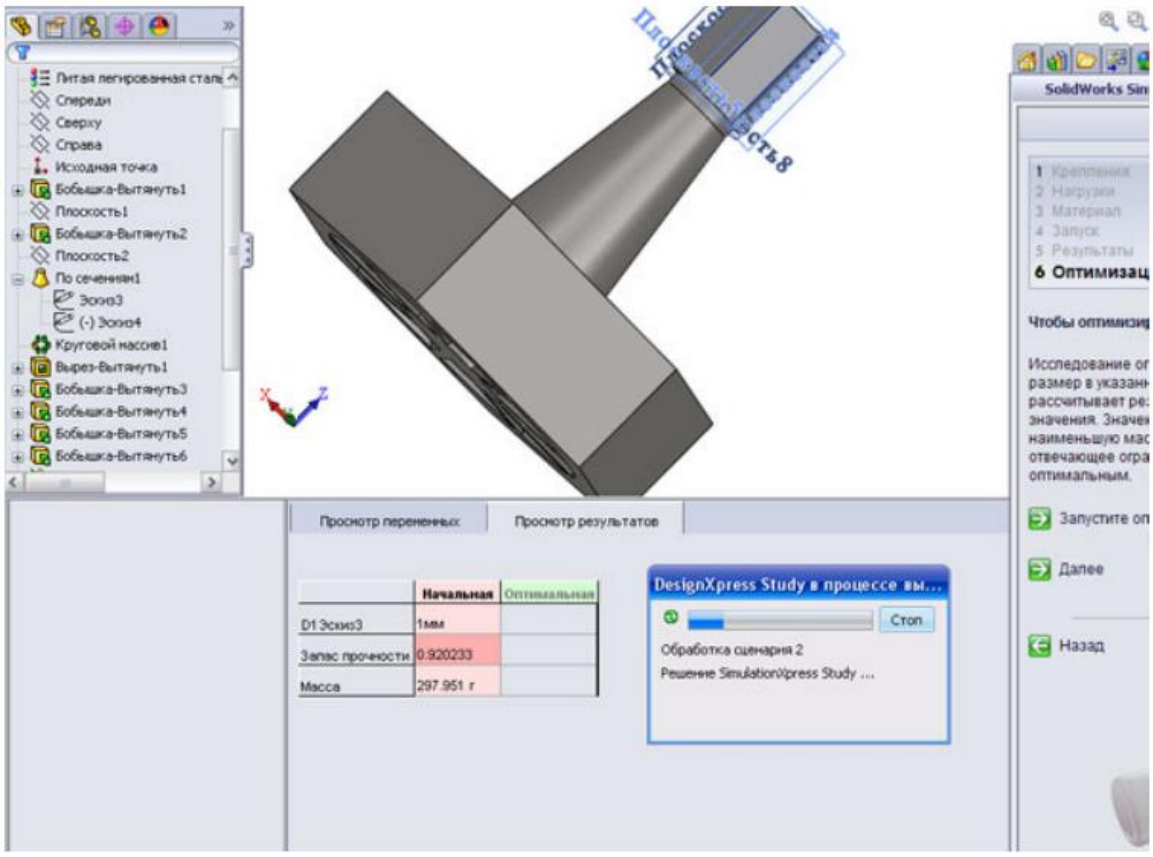


Рисунок 10 – Процесс оптимизации

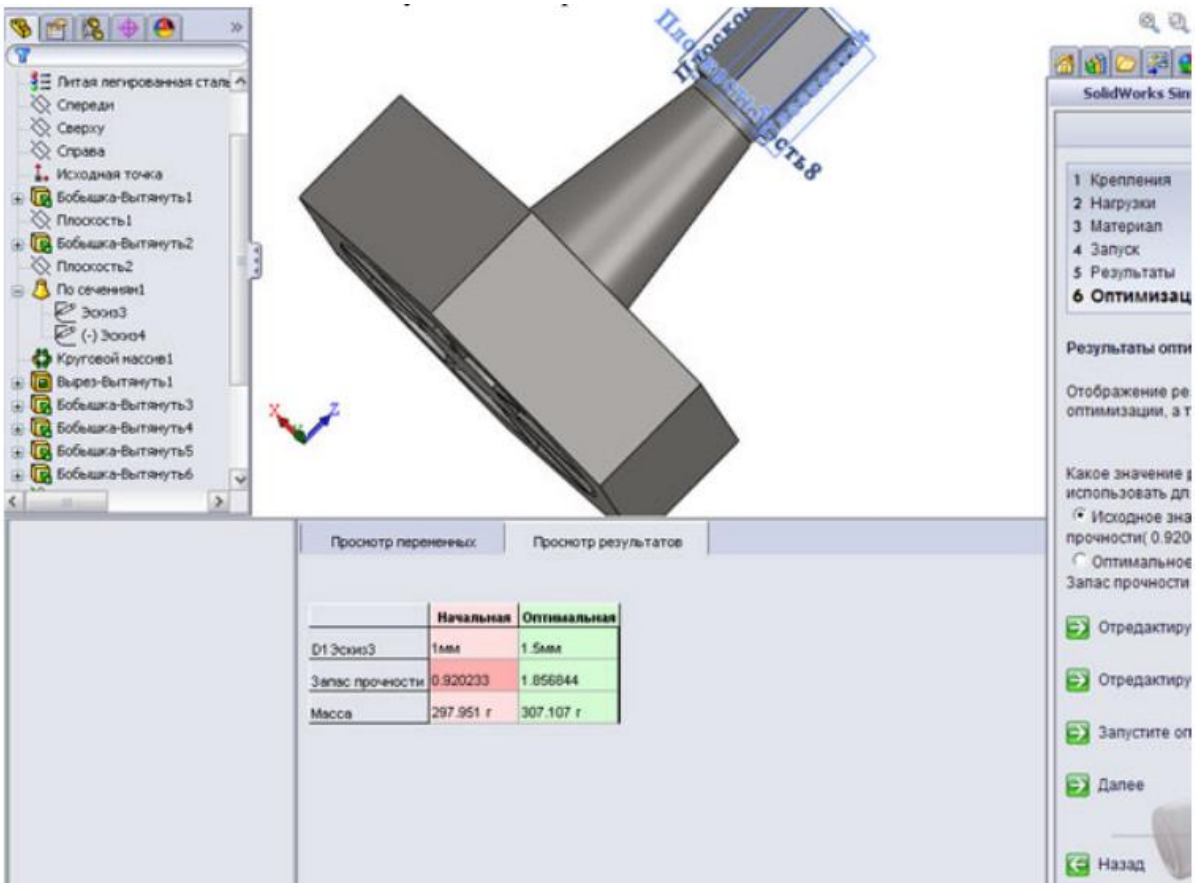


Рисунок 11 – Результат оптимизации

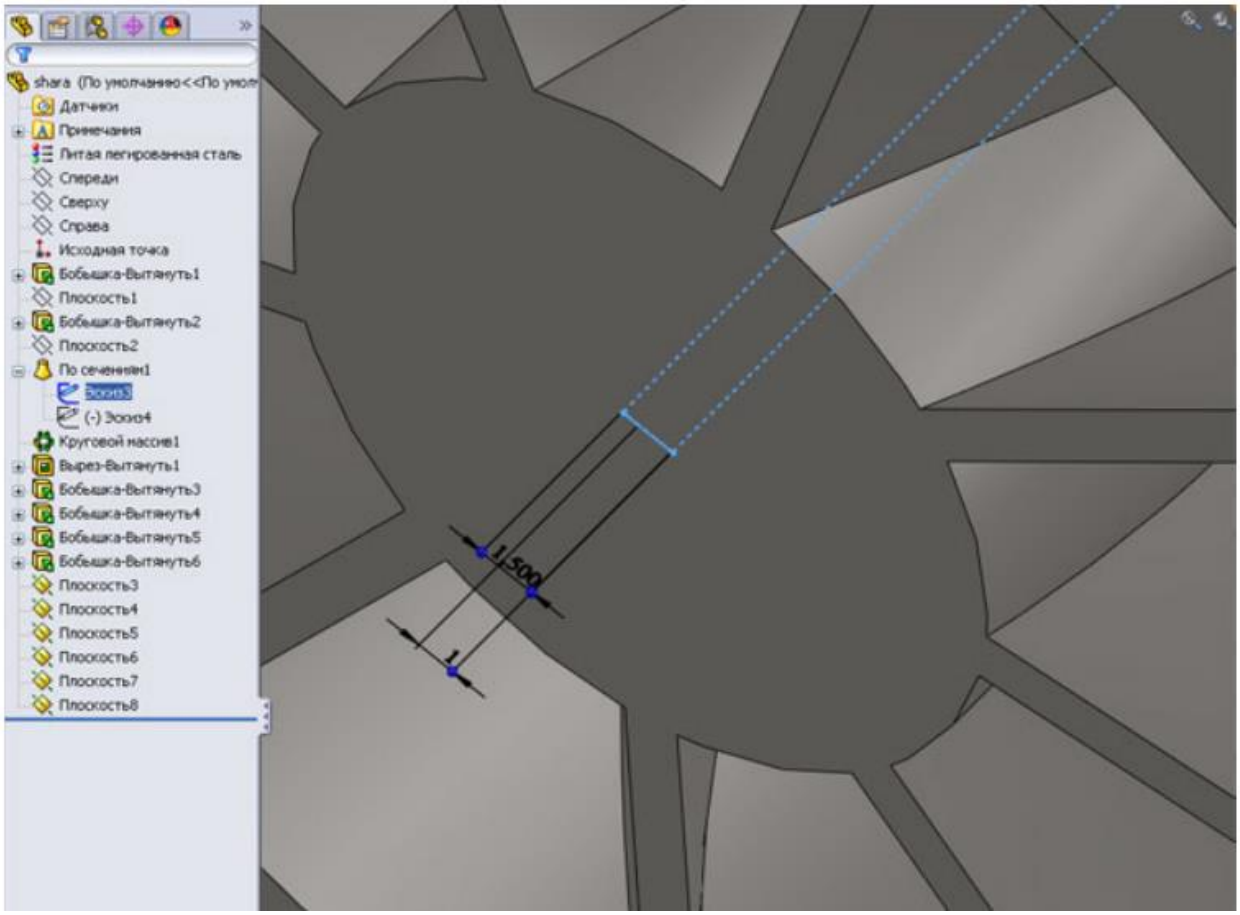


Рисунок 12 – Скорректированный после оптимизации размер детали

Выводы:

1. Проведена оценка прочностных свойств детали. Установлено, что толщина упругих мембран недостаточна для обеспечения работы детали. Коэффициент запаса прочности равен 0.92.

2. Проведена оптимизация критичного размера до 1.5 мм при условии минимизации массы детали. Коэффициент запаса прочности соответствует 1.86.

ЗАДАНИЕ

Исследовать элемент упругого узла для подвижных узлов автомобиля. Модель представлена на рисунке 13 (файл **_shara. SLDPRT**).

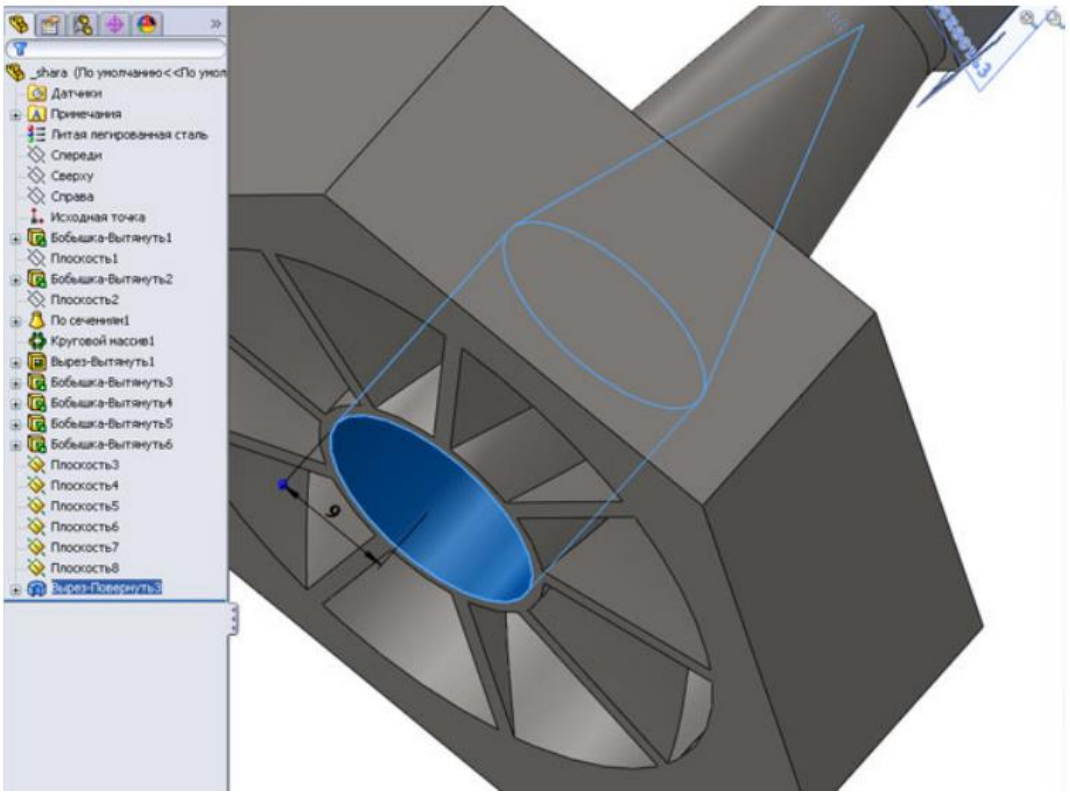


Рисунок 13 – Исследуемая модель

Необходимо:

- оценить прочностные свойства элементов при нагрузке на каждую грань в 1500 Н;
- оптимизировать толщину упругих фигурных мембран (интервал варьирования 1…2 мм).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Порядок построения сценария исследования.
2. Основные возможности SolidWorks SimulationXpress.
3. Порядок построения сценария оптимизации.
4. Порядок назначения условий оптимизации.
5. Корректировка условий оптимизации в ходе решения задачи.
6. Направления расширения исследований с помощью других инструментов SolidWorks.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алямовский, А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Понома- рев. - СПб.: БХВ-Петербург, 2008. - 1040 с.

2. Алямовский, А.А. SolidWorks / COSMOSWorks. Инженеоный анализ методом конечных элементов. - М.: ДМК Пресс, 2004. - 432 с.

3. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004. - СПб.: Питер, 2005. - 768 с.

4. Прохоренко В.П. SolidWorks. Практическое руководство. - М.: ООО "Бином-Пресс", 2004. - 448 с.

5. Справочная система SolidWorks.

7. ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СБОРОК В SOLIDWORKS SIMULATOIN

Цель работы:
приобретение навыков постановки и решения задачи исследования и оптимизации параметров изделия в среде SolidWorks Simulation

СПРАВКА

В процессе формирования модели изделия проектировщик имеет возможность оценить его свойства (массово-габаритные параметры, прочность, частотные характеристики и т.д.) не выходя за рамки среды проектирования. Для стандарта де-факто 3D-моделирования среды Solid- Works характерно наличие множества инструментов такого экспресс-анализа, одним из которых является модуль SolidWorks Simulation. Для активизации этого инструмента следует выполнить команду «Инструменты – Добавления - SolidWorks Simulation» (рисунок 1). В главном меню появляется соответствующая вкладка (рисунок 2).

Рисунок 1 – Активация SolidWorks Simulation

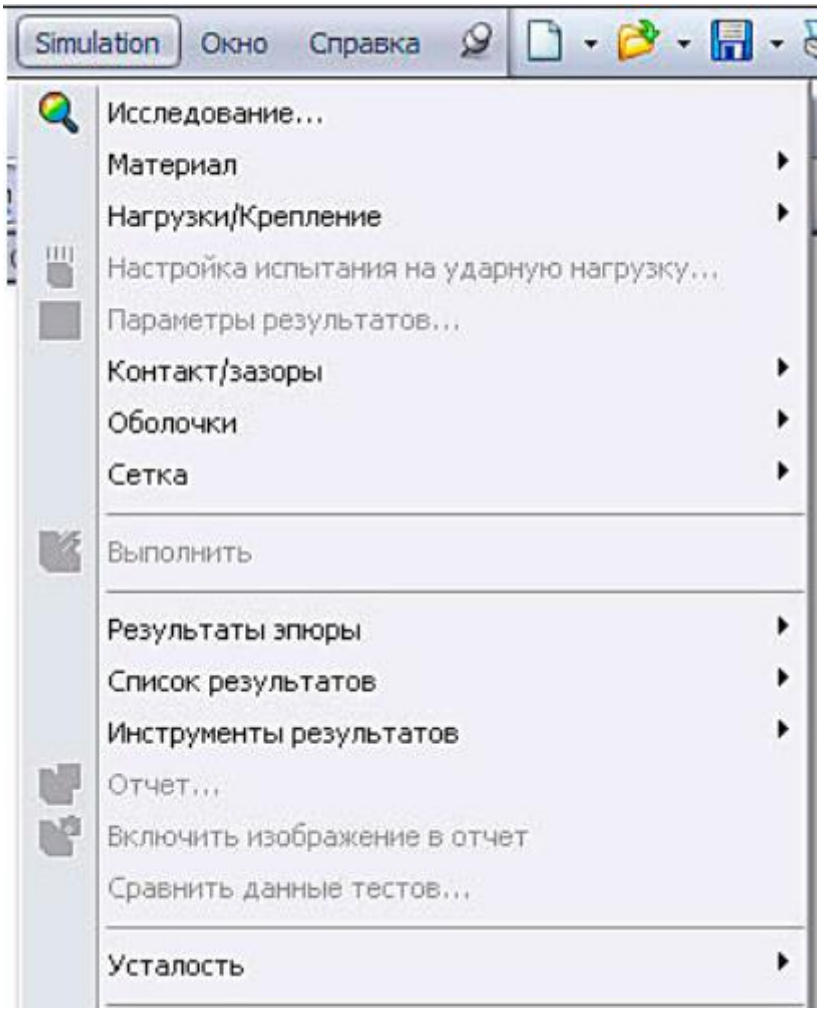


Рисунок 2 – Опция главного меню для SolidWorks Simulation

Для решения задач оптимизации необходимо первоначально выполнить базовое исследование, или все исследования, на базе которых проводится последующая оптимизация конструкции. При наличии результатов базовых исследований, проведенных для одинаковых условий крепления и схем нагружения конструкции, осуществляется переход к задаче ее оптимизации. Для этого необходимо:

- определить цель оптимизации;
- определить переменные проектирования, для которых следует явным образом установить предельные значения (по умолчанию программа принимает исходное значение параметра средним, формируя пределы его изменения в интервале от 0.5 до 1.5 исходного значения);
- определить ограничения минимум на одну характеристику изделия (ограничения могут соответствовать различным типам задач);
- указать вариант итерационного процесса (рисунок 3), обеспечивающий минимизацию числа промежуточных расчетов;

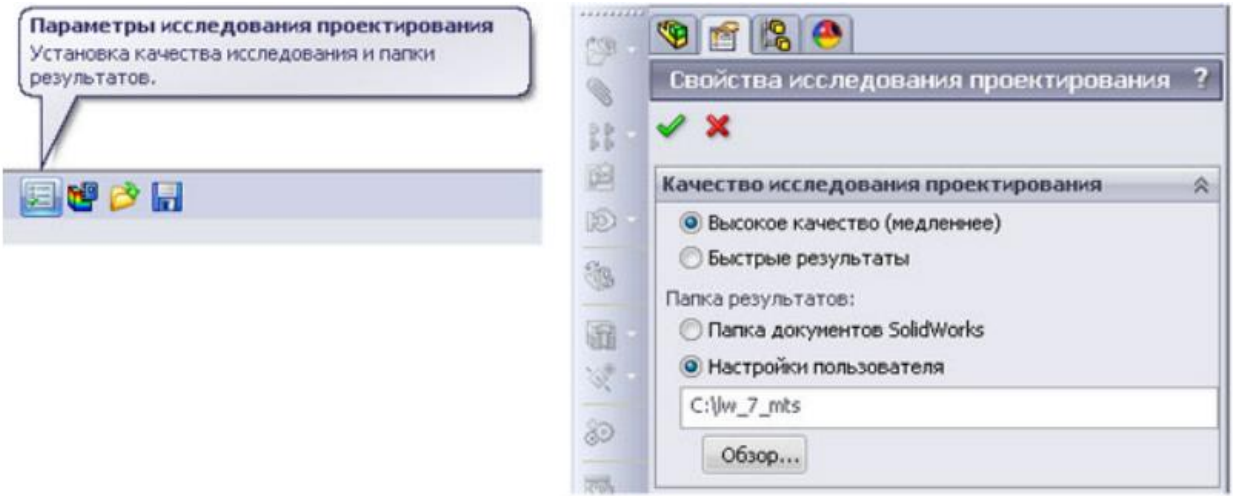


Рисунок 3 – Установка варианта процесса

- при решении задачи комплексной оптимизации для моделей входящих в нее частных задач должен использоваться одинаковый материал.

ПРИМЕР

Постановка задачи

Исследовать прочностные и частотные характеристики автомобиля-робота (рисунки 4,5) и определить оптимальную толщину упругой мембраны для исходных данных:

- цель – минимизация массы конструкции;
- нормальная нагрузка на платформу – 100Н;
- первая частота колебаний – более 70 Hz;
- толщина упругой мембраны – 1…2 мм.

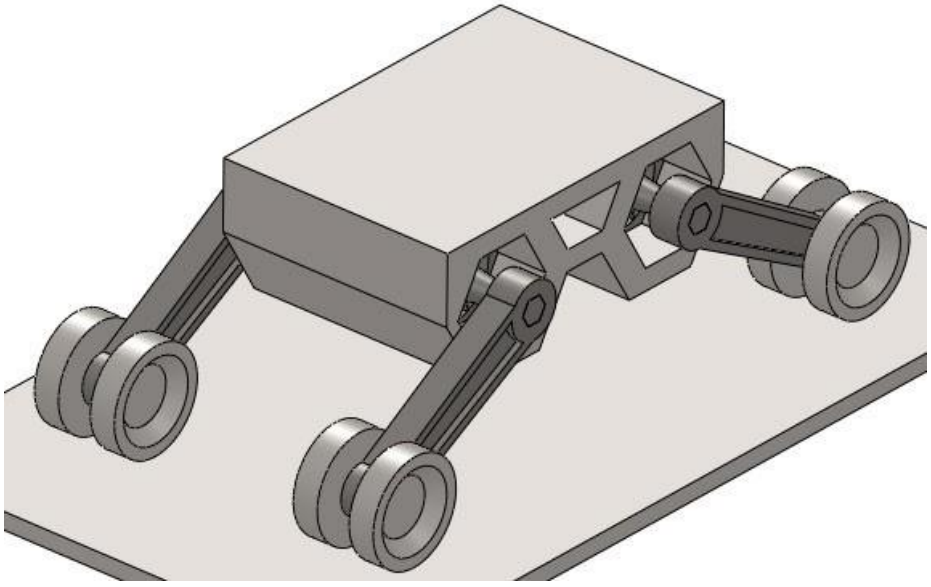


Рисунок 4 – Модель сборки автомобиля-робота

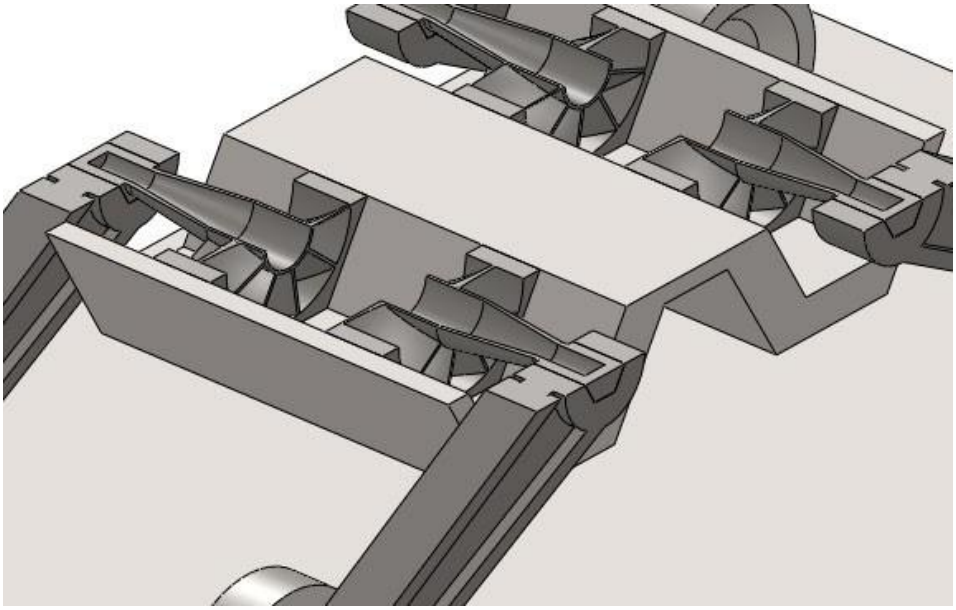


Рисунок 5 – Модель сборки автомобиля-робота

Исследование прочностных характеристик

Для исследований используем упрощенную модель, обеспечивающую получение реальных характеристик, представленную основными элементами конструкции (рисунок 6).

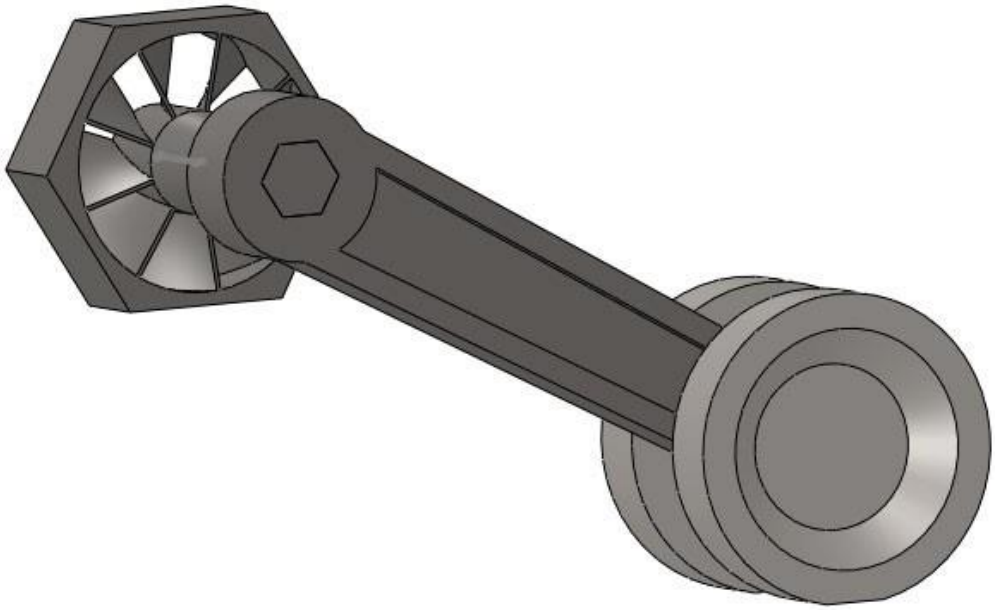


Рисунок 6 – Исследуемая модель сборки автомобиля-робота

Порядок организации и проведения исследования прочностных характеристик модели представлен на рисунках 7…12.

Открываем панель типов исследований «Simulation – Исследование» (рисунок 7). Выбираем для первого приближения «Статическое».

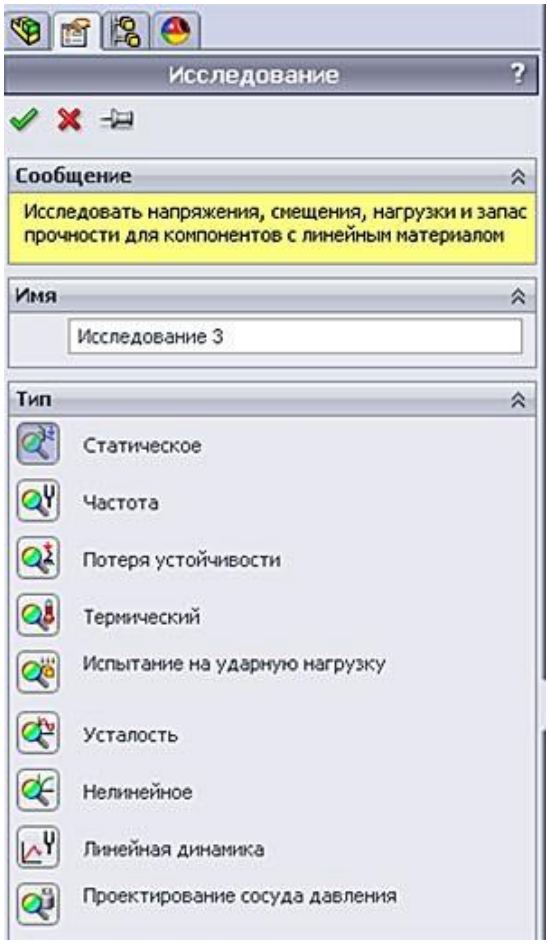


Рисунок 7 – Панель типов исследований

На панели установок данного типа исследования указываем тип контактов компонентов, условия крепления элементов сборки, схему внешнего нагружения (рисунки 8, 9, 10).

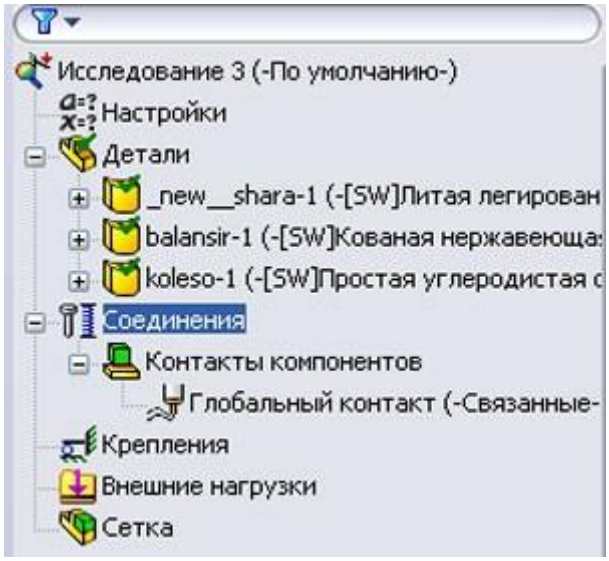


Рисунок 8 – Тип контакта

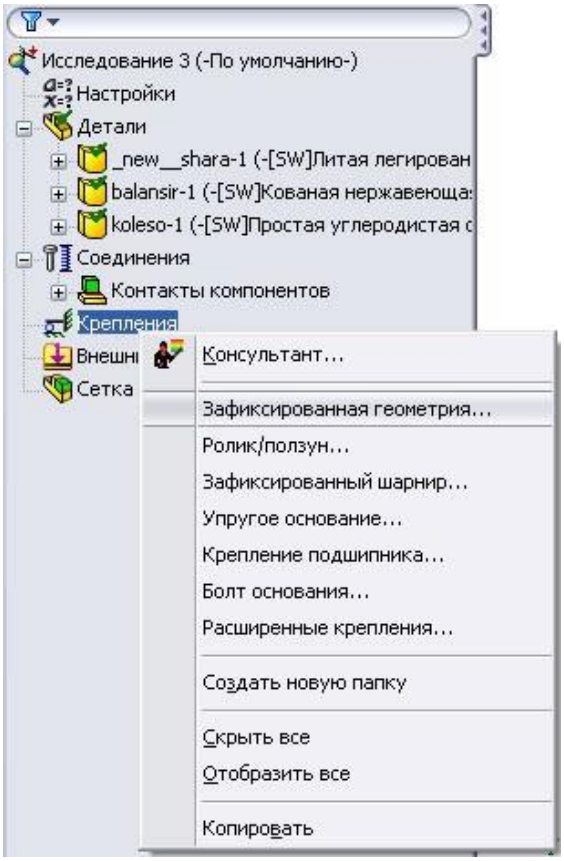


Рисунок 9 – Тип крепления

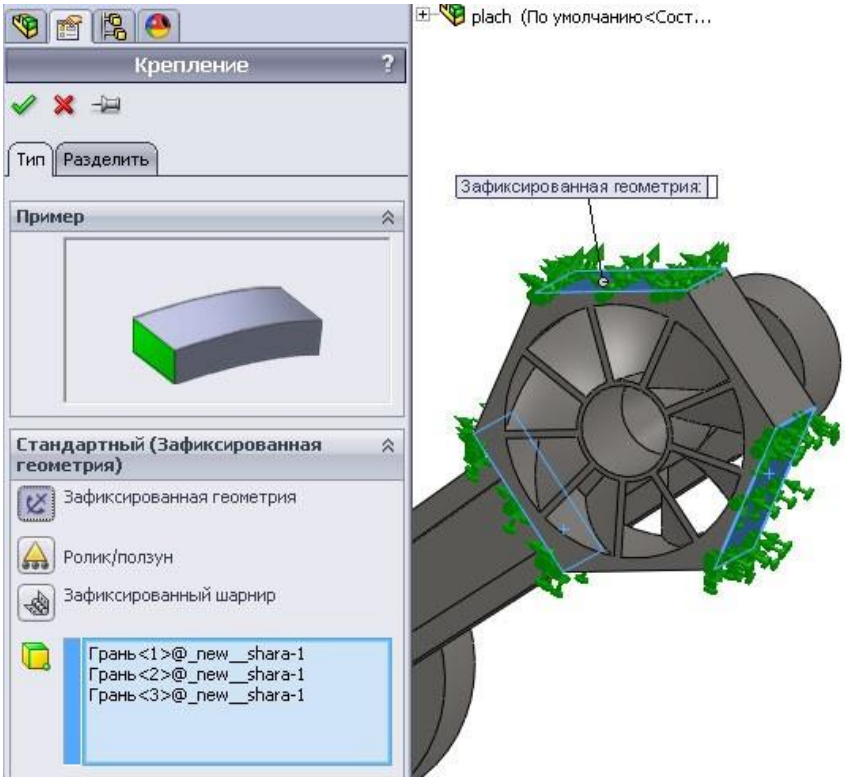


Рисунок 10 – Условия крепления

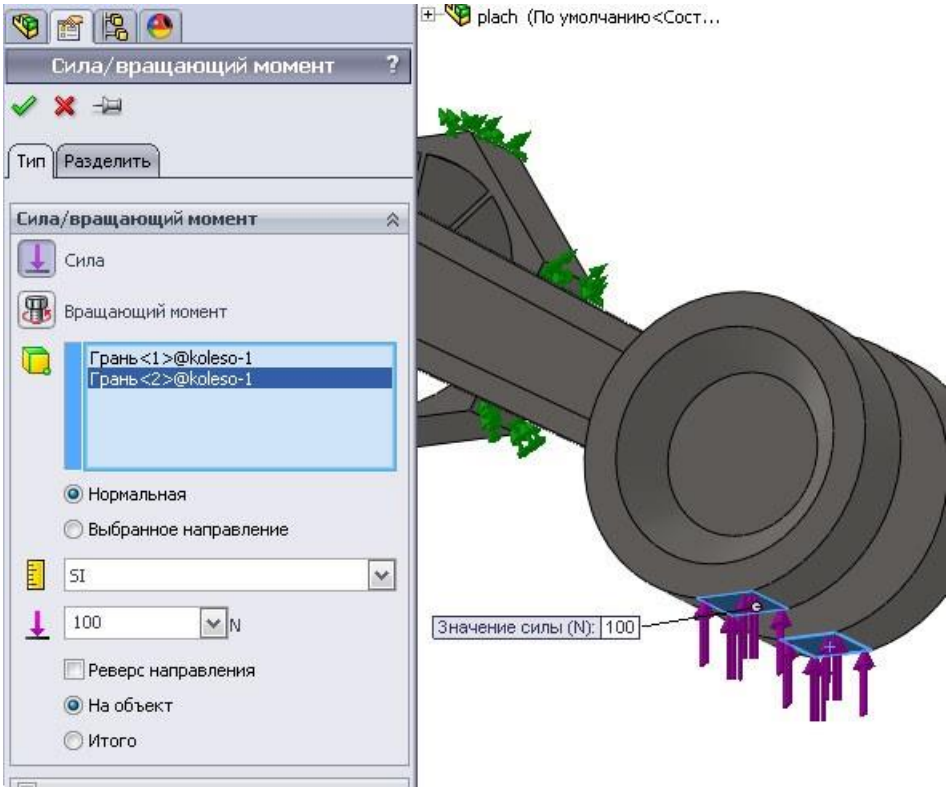


Рисунок 11 – Схема внешнего нагружения

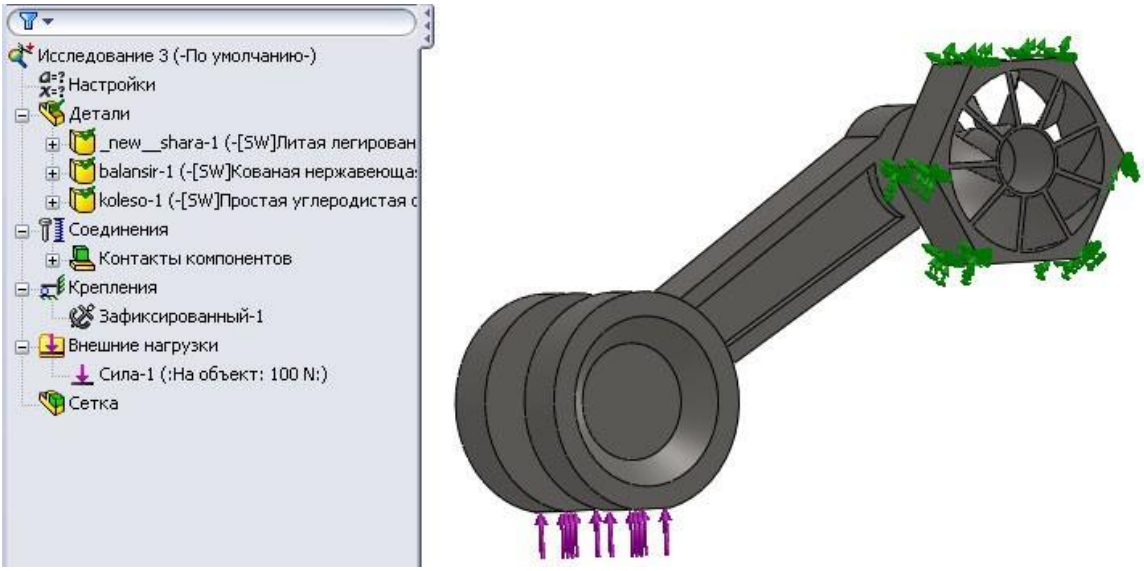


Рисунок 12 – Результат задания условий для исследования на прочность

Для построения сетки следует оценить однородность геометрических размеров конструкции. Программа позволяет упростить исходную модель, указать элементы для особого управления размерами конечных элементов и условия невязки (рисунок 13).

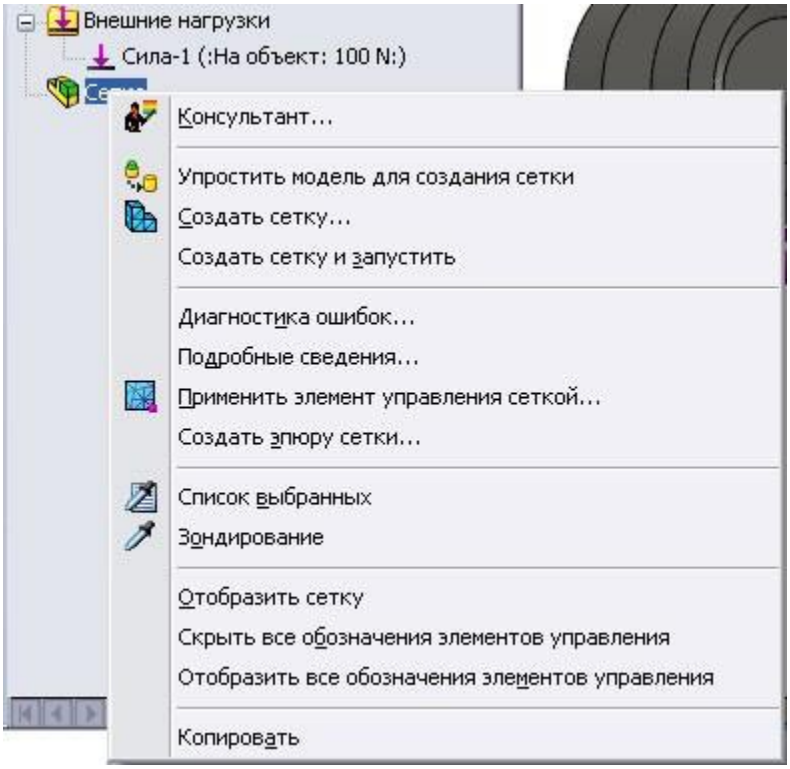


Рисунок 13 – Инструменты работы с сеткой

Наличие тонких мембранных элементов в конструкции упругой части сборки требует введение управления размерами конечных элементов. После активации «Применить элемент управления сеткой» перейдем к выбору элемента в дополнительном экранном дереве конструирования (рисунок 14).

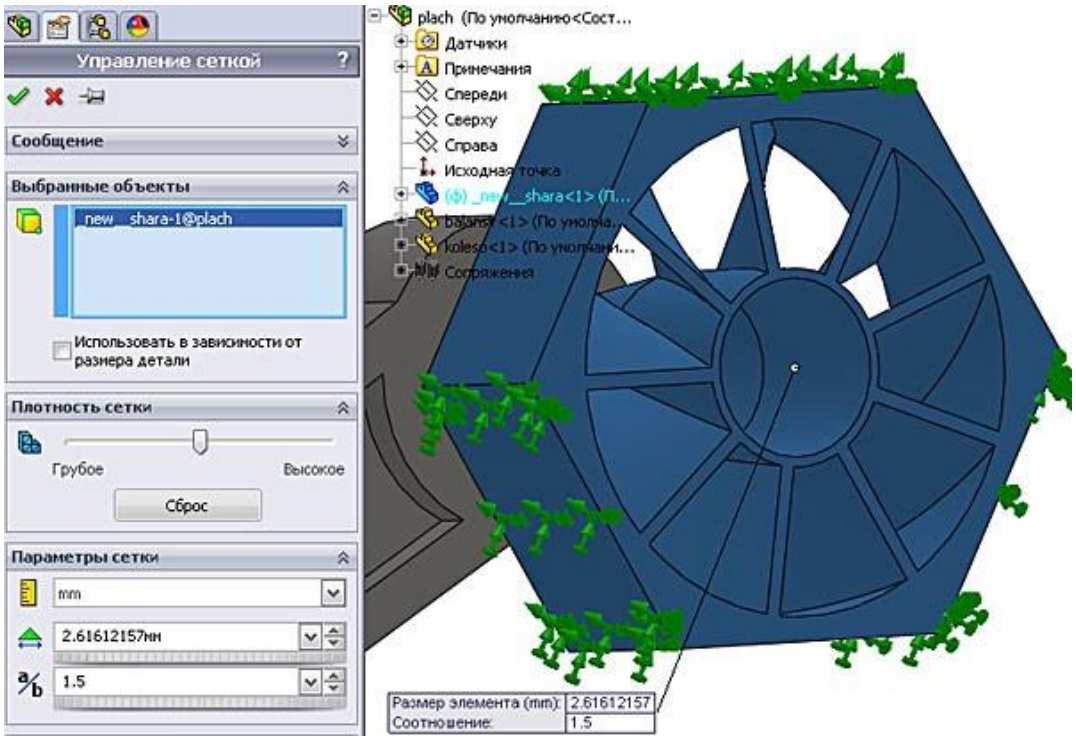


Рисунок 14 – Выбор элемента управления сеткой

С панели инструментов работы с сеткой (рисунок 13) переходим к формированию сетки (рисунок 15).

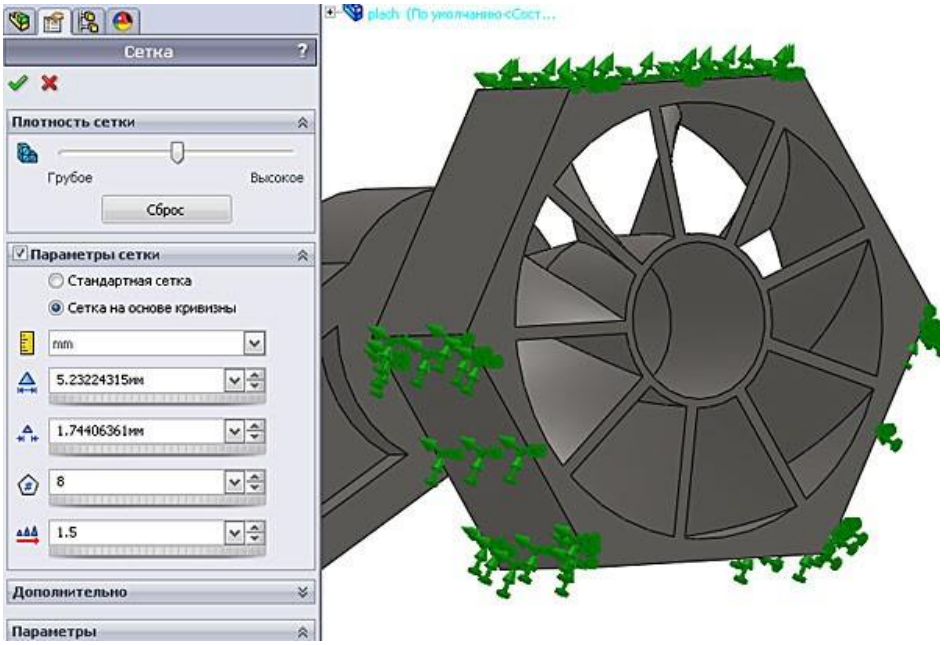


Рисунок 15 – Настройки параметров сетки

Результаты построения сетки показаны на рисунке 16.

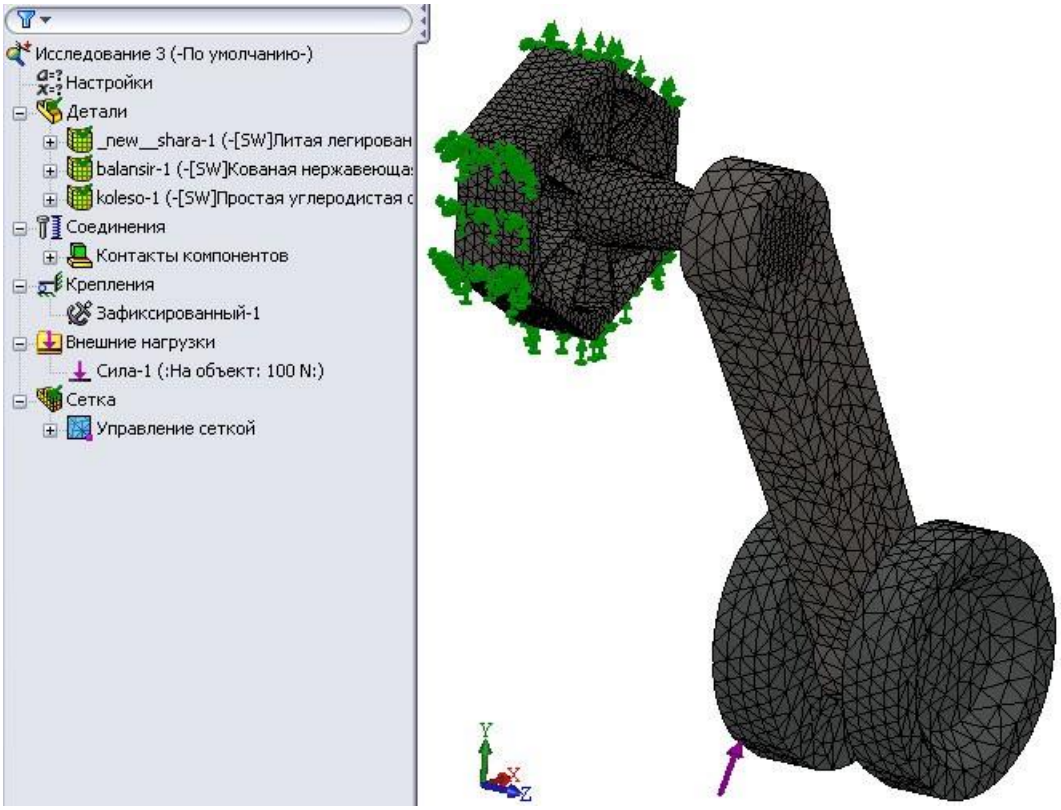


Рисунок 16 – Результат создания сетки

Далее запускаем решение сформированной задачи (рисунок 17).

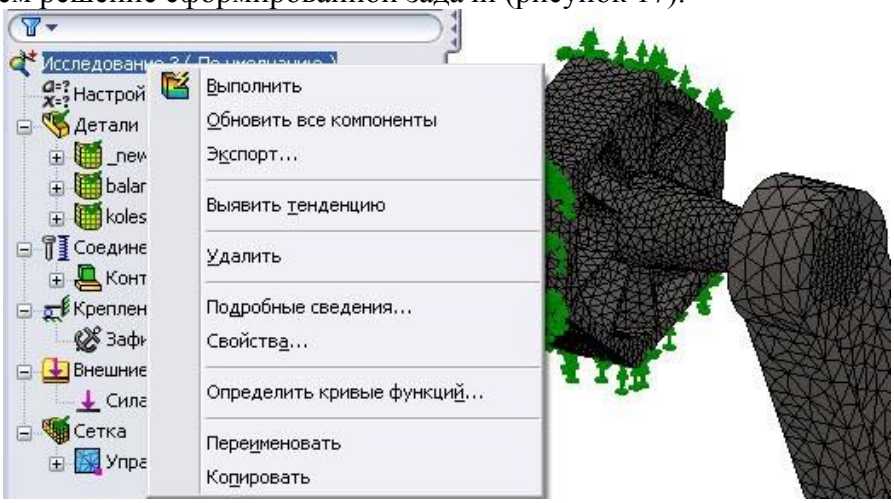


Рисунок 17 – Запуск решения задачи

Результаты решения показаны на рисунках 18, 19, 20. Кроме «обычных» 3D-эпюр программа располагает исчерпывающим инструментарием представления результатов исследований.

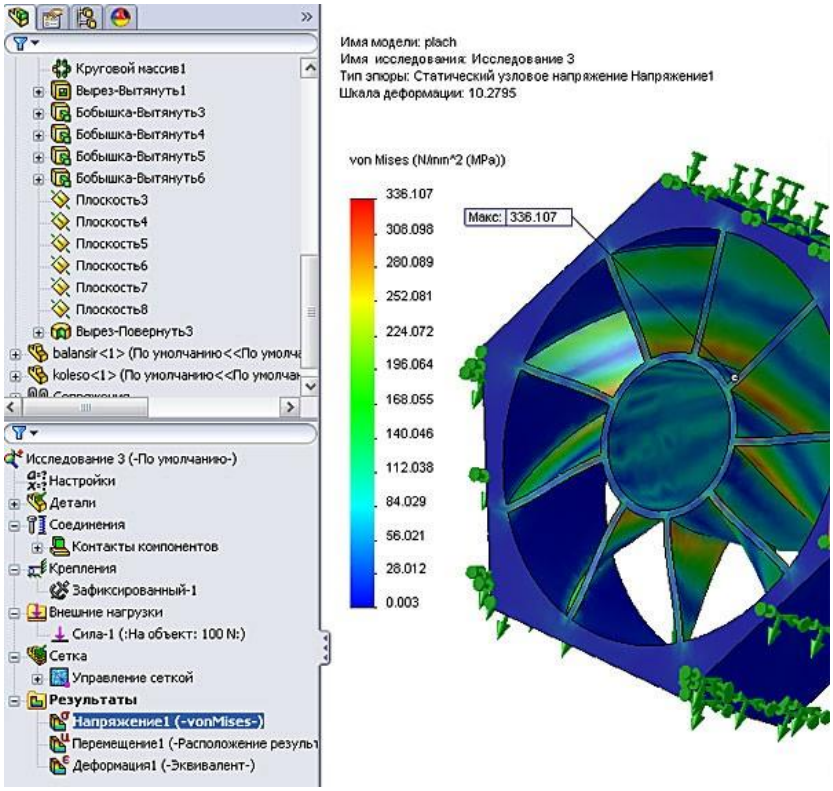


Рисунок 18 – Эпюра напряжений

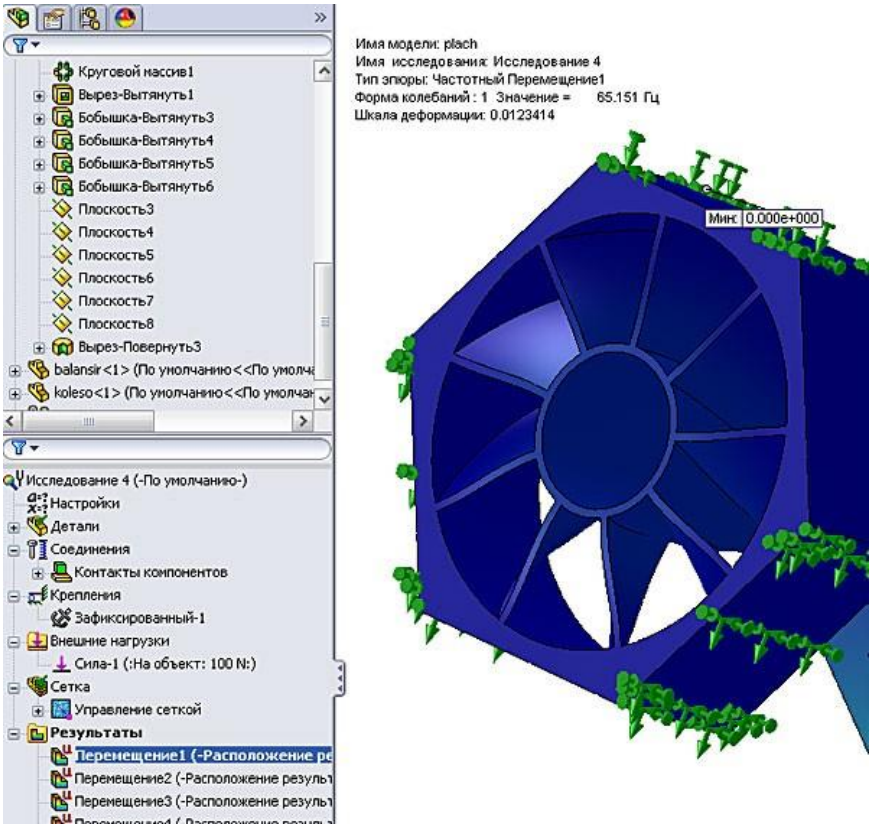


Рисунок 19 – Эпюра перемещений

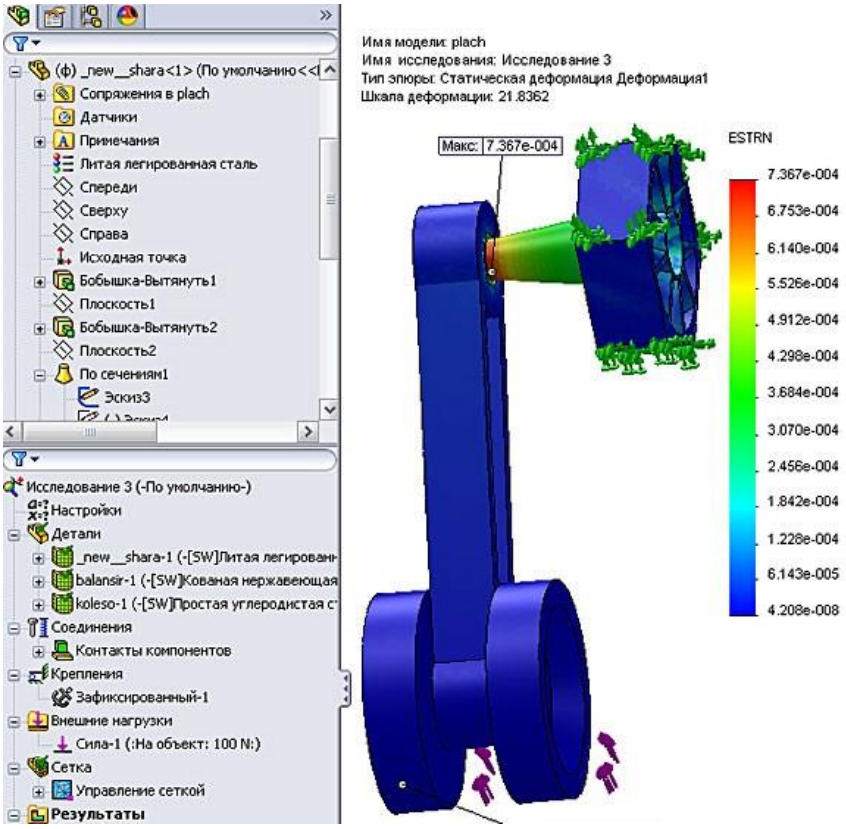


Рисунок 20 – Эпюра деформаций

Аналогичным образом проводим частотные исследования. При этом условия задачи должны быть полностью сохранены. Для исключения повторного проведения настроек используем их

копирование (по каждой составляющей отдельно) из предыдущей задачи (нижняя позиция рисунка 17). Результаты решения задачи частотного анализа показаны на рисунке 21.

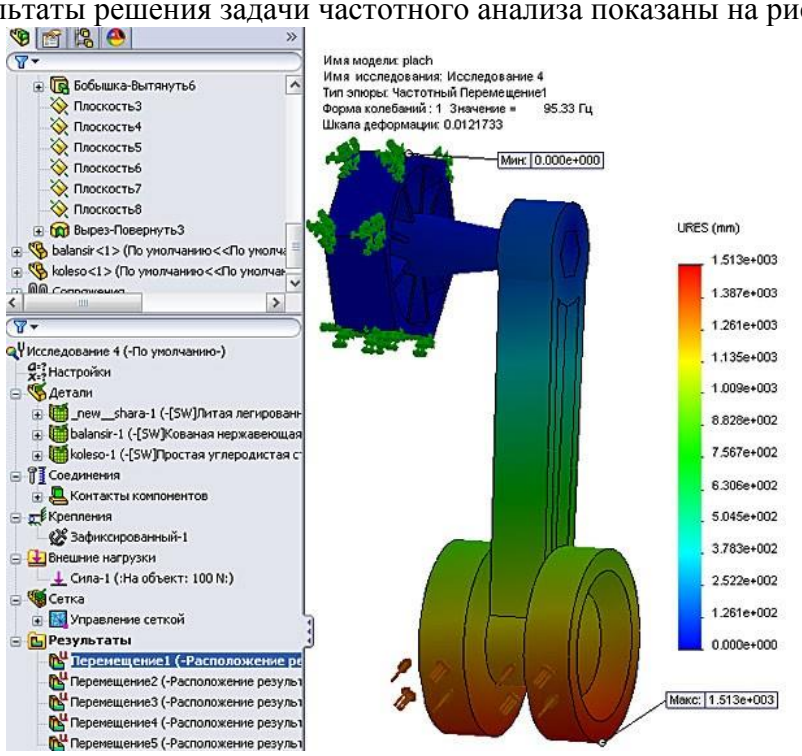


Рисунок 21 – Результаты исследования частотных свойств конструкции

Наличие результатов базовых исследований позволяет перейти к решению задачи оптимизации конструкции в очерченных ранее условиях. Для начала активируем опции «Вставка – Исследование проектирования - Добавить» (рисунок 22). После этого становятся доступными инструменты решения задачи оптимизации конструкции (рисунок 23).

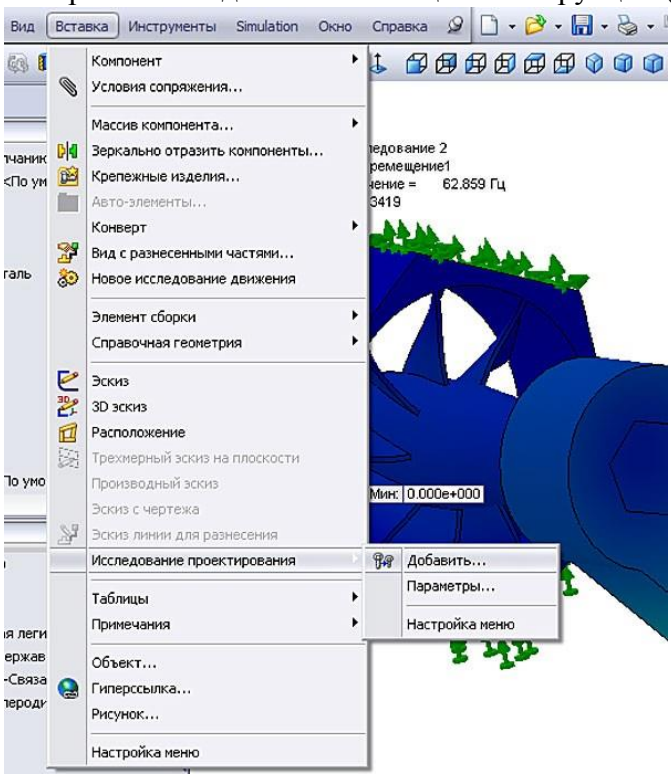


Рисунок 22 – Добавление инструментов решения задачи оптимизации

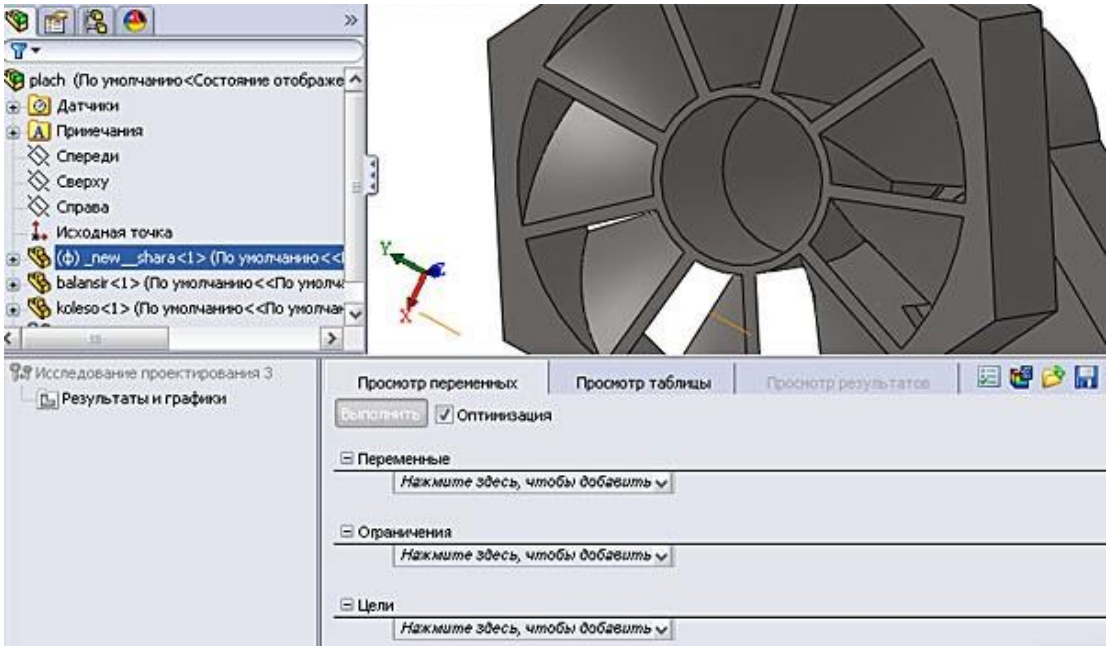


Рисунок 23 – Панель задания условий решения задачи оптимизации

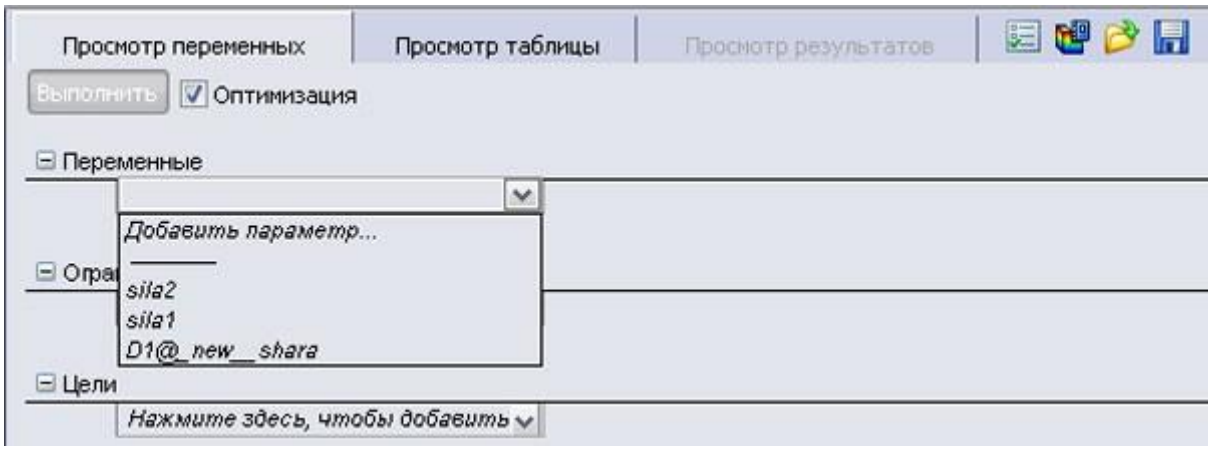


Рисунок 24 – Задание переменных

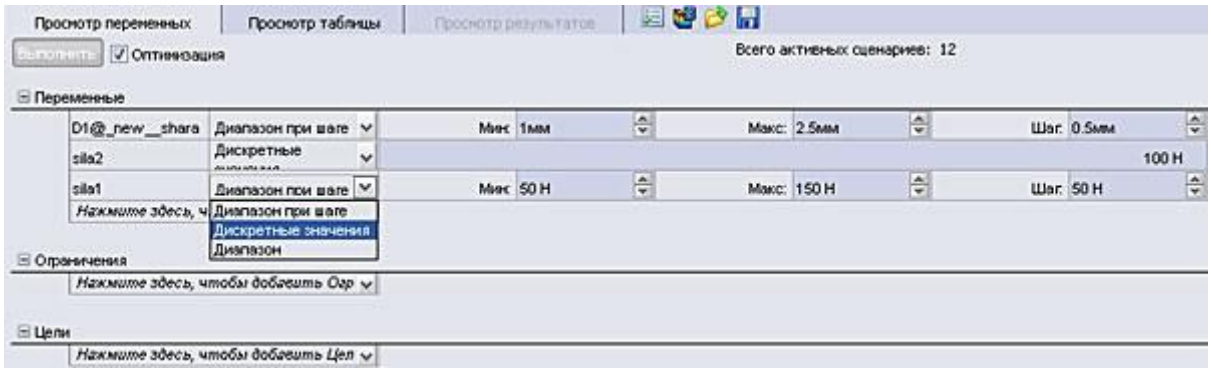


Рисунок 25 – Задание типа переменной

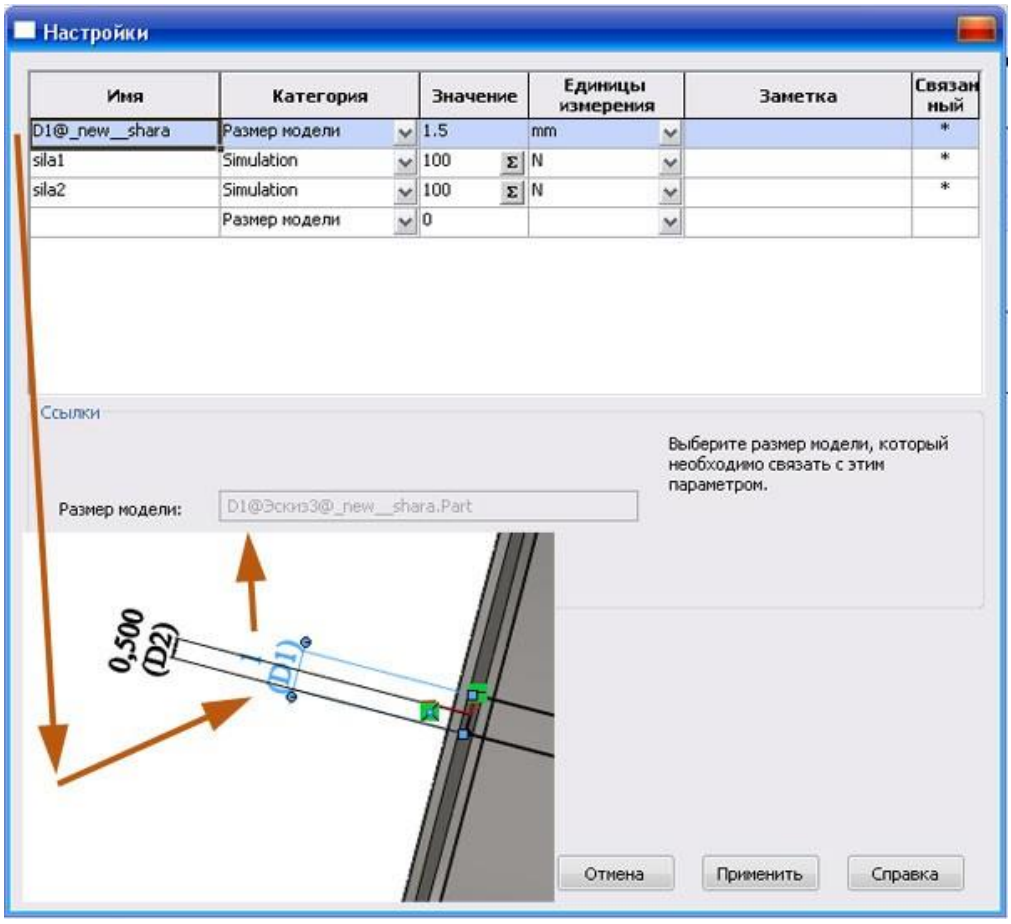


Рисунок 26 – Указание ссылки на параметр (размер) в модели

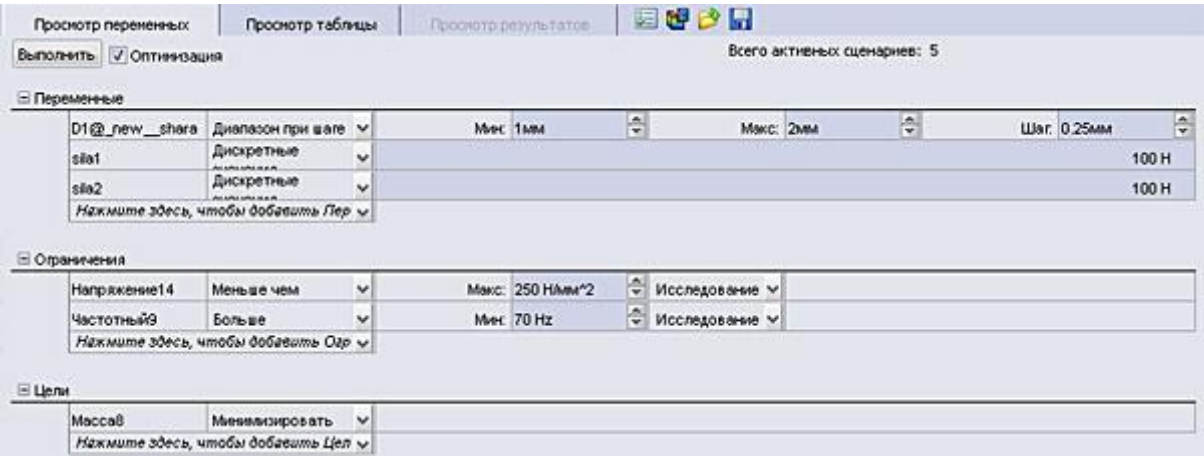


Рисунок 27 – Комплекс условий оптимизации

		Текущая	Начальная	Оптимальная (2)	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 4	Сценарий 5
D1@_new__shara		1мм	1мм	1.25мм	1мм	1.25мм	1.5мм	1.75мм	2мм
sila1		100 Н	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н
sila2		100 Н	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н
Напряжение14	< 250 Н/мм^2	336.11 Н/мм^2	336.11 Н/мм^2	229.48 Н/мм^2	336.11 Н/мм^2	229.48 Н/мм^2	195.38 Н/мм^2	193.82 Н/мм^2	193.1 Н/мм^2
Частотный9	> 70 Hz	65.12175 Hz	65.12175 Hz	76.87328 Hz	65.12172 Hz	76.87328 Hz	85.22656 Hz	91.20531 Hz	95.33044 Hz
Масса8	Минимизировать	1.106280	1.106280	1.110847	1.106280	1.110847	1.115417	1.119992	1.124571

Рисунок 28 – Ход и результаты оптимизации

щая	Начальная	Оптимал			Сценарий 3	Сценарий 4	Сценарий 5
	1мм	1.25мм			1.5мм	1.75мм	2мм
	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н
	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н	100 Н
мм^2	336.11 Н/мм^2	229.48 Н/мм^2	336.11 Н/мм^2	229.48 Н/мм^2	195.38 Н/мм^2	193.82 Н/мм^2	193.1 Н/мм^2
Hz	65.12175 Hz	76.87328 Hz	65.12172 Hz	76.87328 Hz	85.22656 Hz	91.20531 Hz	95.33044 Hz
	1.106280	1.110847	1.106280	1.110847	1.115417	1.119992	1.124571

Рисунок 29 – Переход к формированию отчета

Выводы:

1. В заданных условиях проведены исследования прочностных и частотных свойств конструкции автомобиля-робота, определены базовые значения свойств конструкции.
2. Осуществлена оптимизация массы конструкции для заданных ограничений по максимальному напряжению и первой частоте в диапазоне изменения толщины упругой мембраны 1…2 мм.

ЗАДАНИЕ

1. В условиях рассмотренного примера решить задачу оптимизации для изделия при изменении межосевого расстояния балансира в диапазоне 100…140 мм.
2. Составить отчет по результатам решения задачи оптимизации.

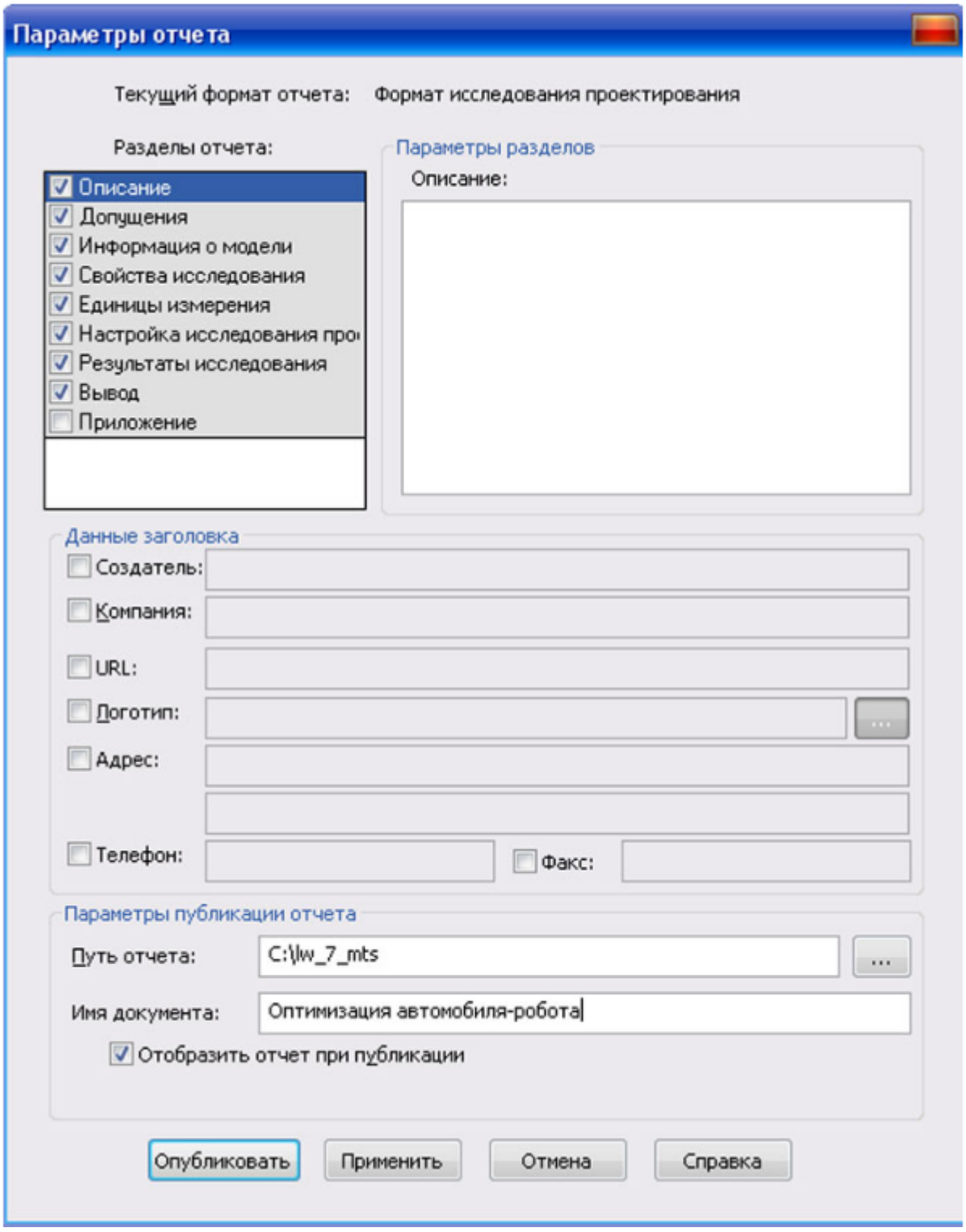


Рисунок 30 – Панель формирования содержания отчета

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие комплексной оптимизации.
2. Возможности модуля SolidWorks Simulation.
3. Необходимые условия для решения задач оптимизации с использованием модуля SolidWorks Simulation.
4. Порядок задания цели проекта.
5. Порядок задания интервалов варьирования оптимизируемых параметров.

6. Порядок задания ограничений.
7. Какой вариант решения является целесообразным с технологической точки зрения.
8. Какие из параметров в наибольшей степени оказывают влияние на результат решения задачи.
9. Положительные моменты работы в модуле SolidWorks Simulation.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алямовский, А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. - СПб.: БХВ-Петербург, 2008. - 1040 с.
2. Алямовский, А.А. SolidWorks / COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. - М.: ДМК Пресс, 2004. - 432 с.
3. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004. - СПб.: Питер, 2005. - 768 с.
4. Прохоренко В.П. SolidWorks. Практическое руководство. - М.: ООО "Бином-Пресс", 2004. - 448 с.
5. Справочная система SolidWorks.

8. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНСТРУКЦИИ В СИСТЕМЕ SOLIDWORKS MOTION

Цель работы:
приобретение навыков постановки и решения задачи исследования динамических свойств конструкций автотракторной техники в SolidWorks Motion.

СПРАВКА

Исследование динамических свойств конструкций осуществляется с помощью специализированных программных комплексов, одним из которых является SolidWorks Motion. Комплекс обеспечивает исследование движения при точном моделировании анализ движения в сборке, принимая в расчет силы, пружины, демпферы, эффекты трения. В исследовании движения объединяются элементы движения с сопряжениями. Поэтому ограничения движения, свойства материала, масса и контакты компонентов включаются в вычисления кинематической решающей программы.

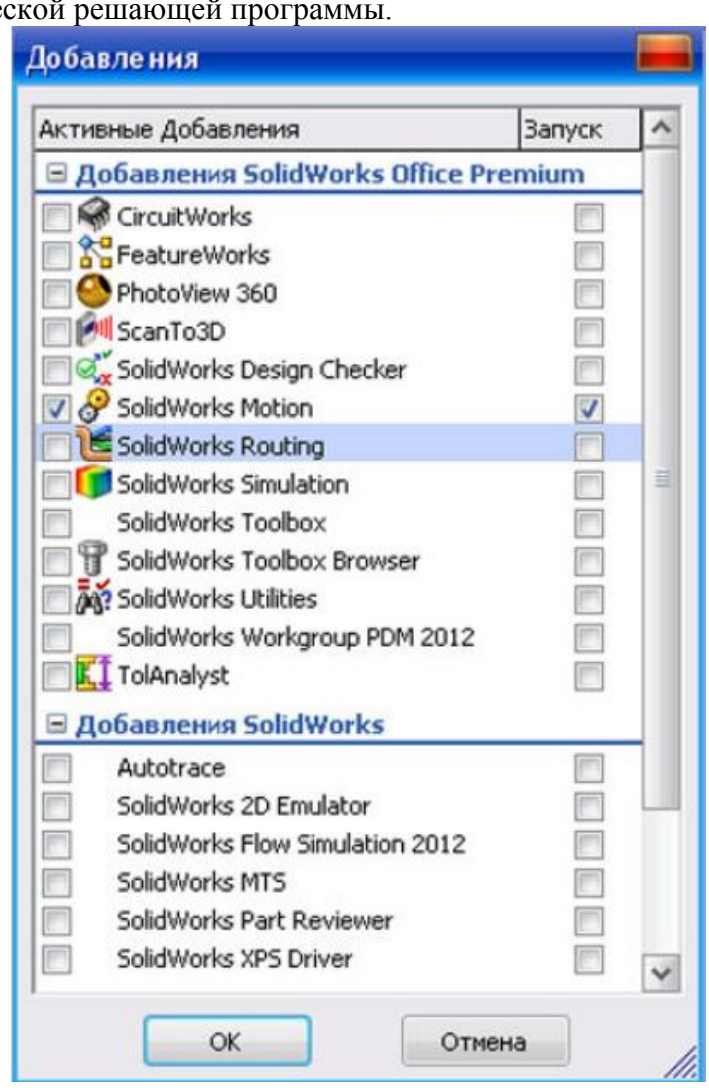


Рисунок 1 – Активация SolidWorks Motion

Анализ движения обеспечивает также расчет нагрузок, которые могут быть использованы для определения условий нагружения в структурном анализе.

Для активизации инструмента SolidWorks Motion анализа движения следует выполнить команду «Инструменты – Добавления - SolidWorks Motion» (рисунок 1). Использование решающей программы комплекса обеспечивается выбором типа исследования (анализ движения**)** в списке типов исследования в MotionManager в ни жней части окна документа SolidWorks исследования (рисунок 2).

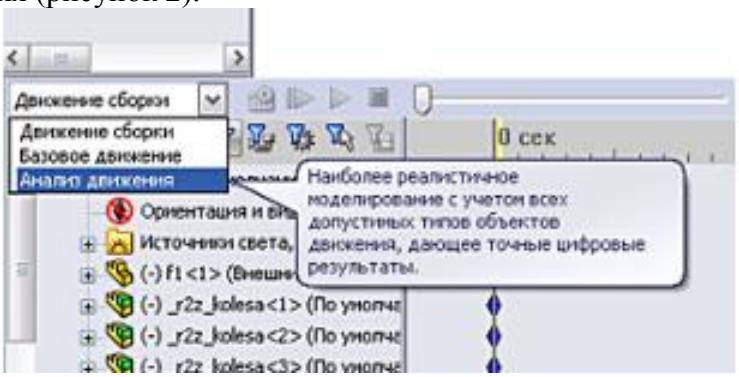


Рисунок 2 – Список типов исследования

Дальнейшие варианты действий определяются спецификой решаемой задачи. Пример одного из вариантов дан ниже по тексту.

ПРИМЕР

Постановка задачи

Исследовать положение центра масс и скорость перемещения контрольной точки спортивного автомобиля на участке дороги длиной 20 м со специальным профилем при скорости движения автомобиля 9 км/ч.

Полномасштабная модель спортивного автомобиля показана на рисунке 3, а участок дороги с размещенным на нем автомобилем - на рисунке 4.

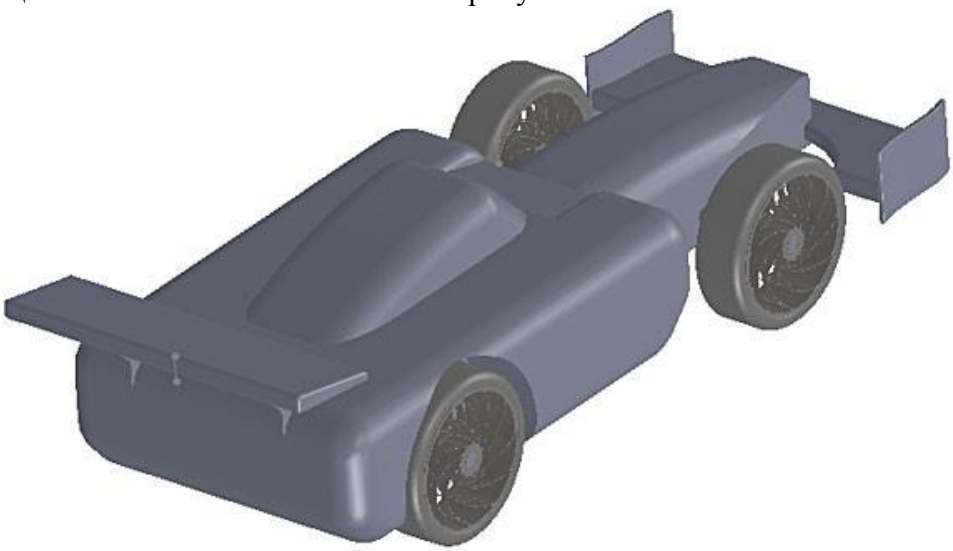


Рисунок 3 – Модель сборки автомобиля

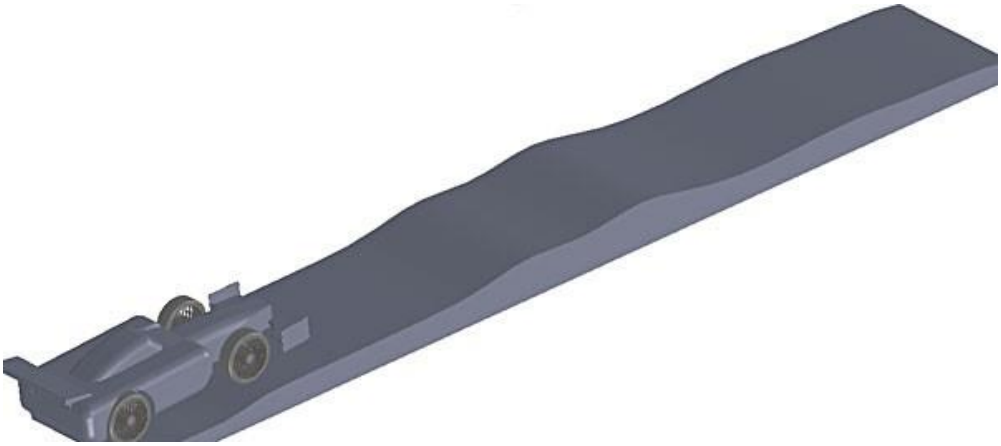


Рисунок 4 – Модель сборки автомобиля и участка дороги

Задание условий движения

Для исследования движения следует задать тип анализа (рисунок 2), выбрать источник энергии (двигатель, рисунок 5).

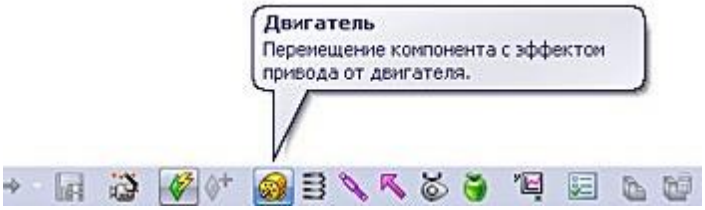


Рисунок 5 – Выбор источника энергии

При этом имеется возможность выбора двигателя вращения и линейного двигателя. Двигатель вращения имитирует крутящий момент (рисунок 6). При использовании этого типа двигателя следует указать элемент колеса, к которому «приложен» крутящий момент, и направление вращения колеса. Далее следует выбрать характеристику скорости движения. Для при мера выбрана постоянная угловая скорость 100 оборотов в минуту.

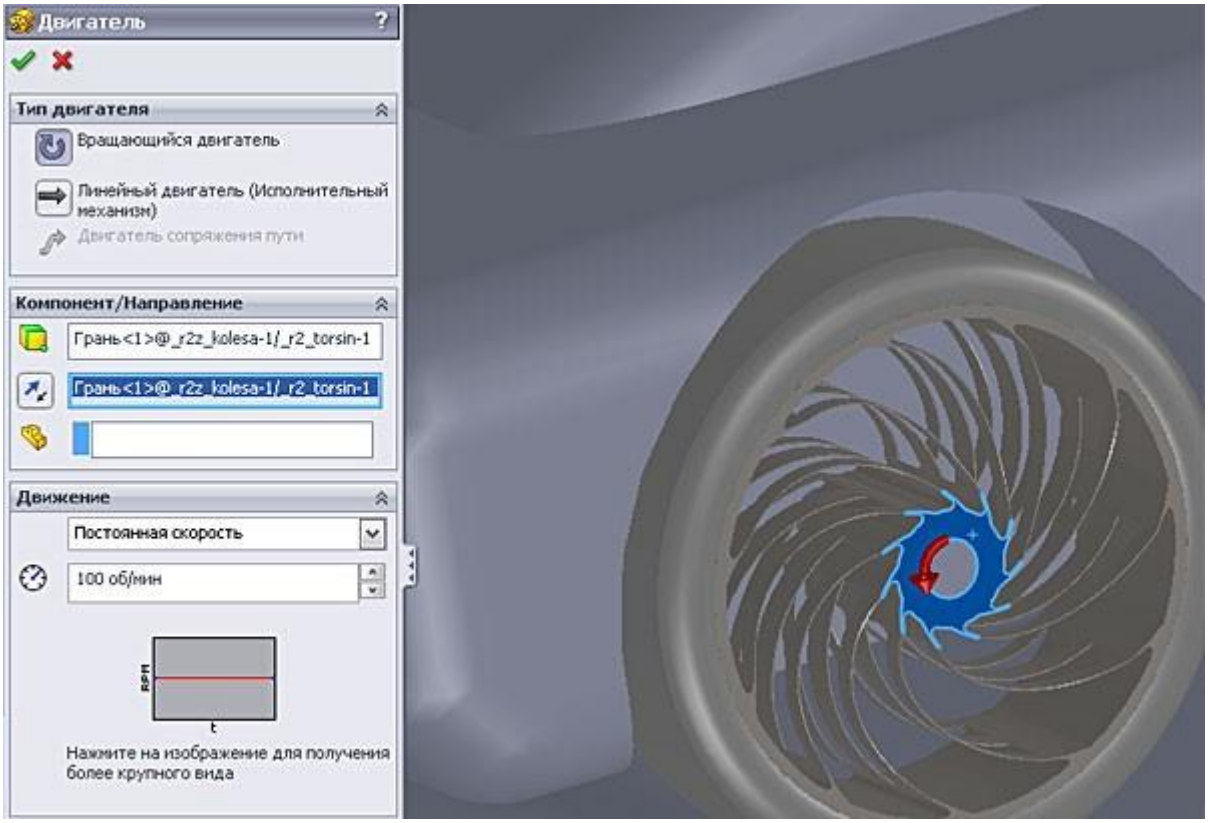


Рисунок 6 – Установка характеристик двигателя вращения

После указания характеристик движения для каждого «ведущего» колеса следует провести расчет движения (первая кнопка, рисунок 7). На временной линейке отразится характер изменения параметров движения (рисунок 7).

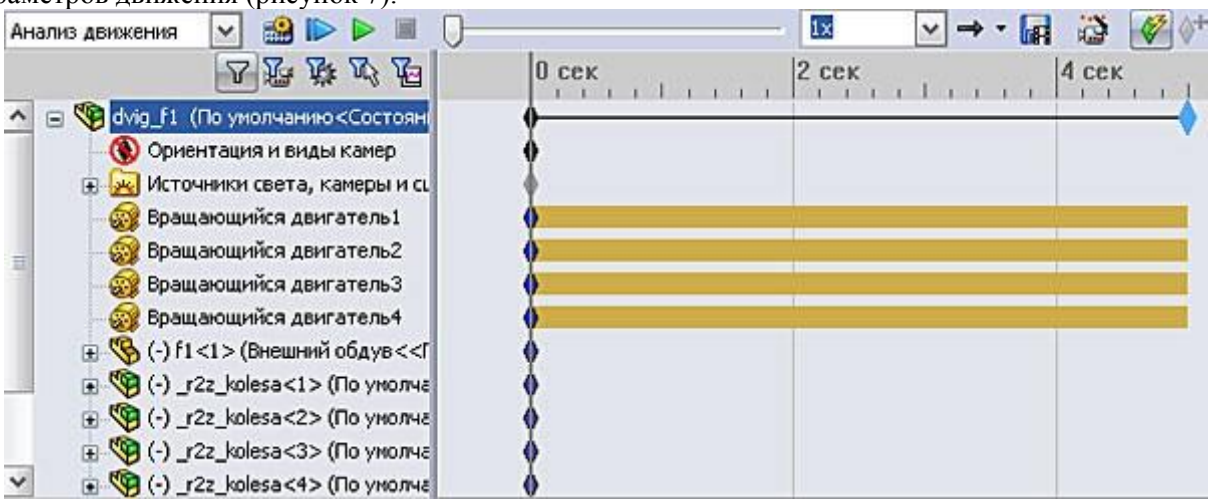


Рисунок 7 – Использование двигателя вращения для четырех «ведущих» колес

При использовании линейного двигателя следует указать элемент конструкции, к которому приложено силовое воздействие, направление его приложения, характеристику движения и ее величину (рисунок 8).

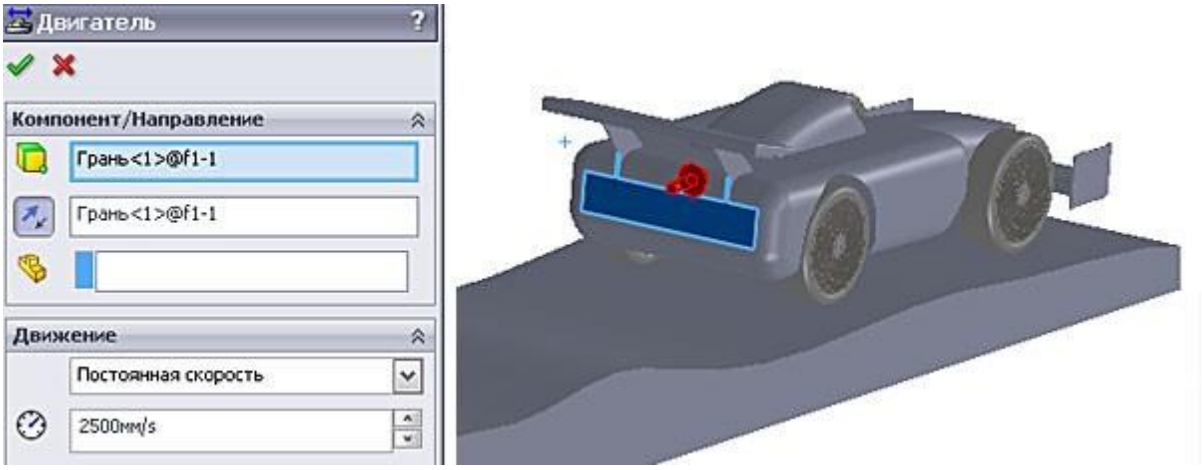


Рисунок 8 – Панель типов исследований

После запуска расчета характеристик движения на временной линейке отразится результат расчета (рисунок 9). При необходимости можно в каждый интересующий исследователя момент времени установить ключевой кадр (линейка «Ориентация и виды камер», рисунок 9) и определить масштаб и ракурс визуального рассмотрения движения.

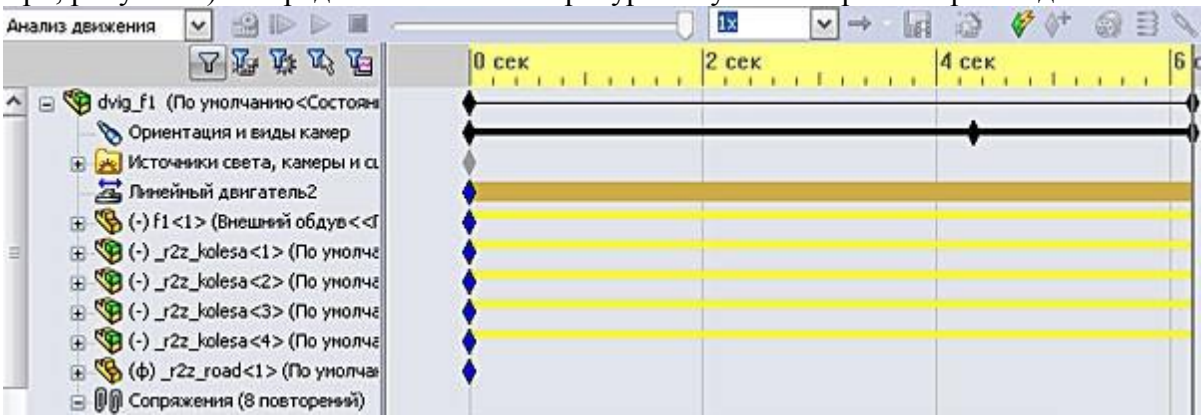


Рисунок 9 – Результаты расчета при использовании линейного двигателя

Моделирующий комплекс обеспечивает возможность построения графиков для различных характеристик движения, относящихся как к отдельным элементам конструкции, так и ко всей конструкции в целом. Для этого следует активизировать кнопку представления результатов (рисунок 10) и указать (рисунок 11) характеристику движения, элемент конструкции или координаты исследуемой точки, результирующий результат или элемент его разложения по координатным осям, элементы конструкции.

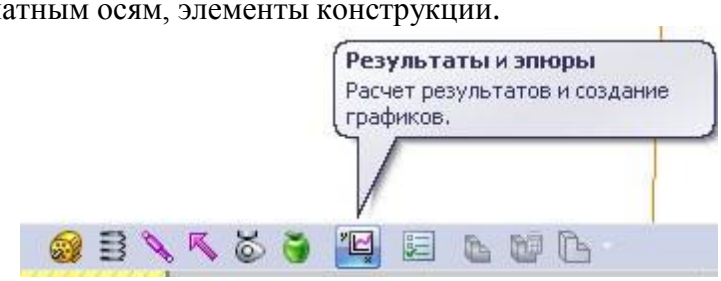


Рисунок 10 – Активизация вывода характеристик движения

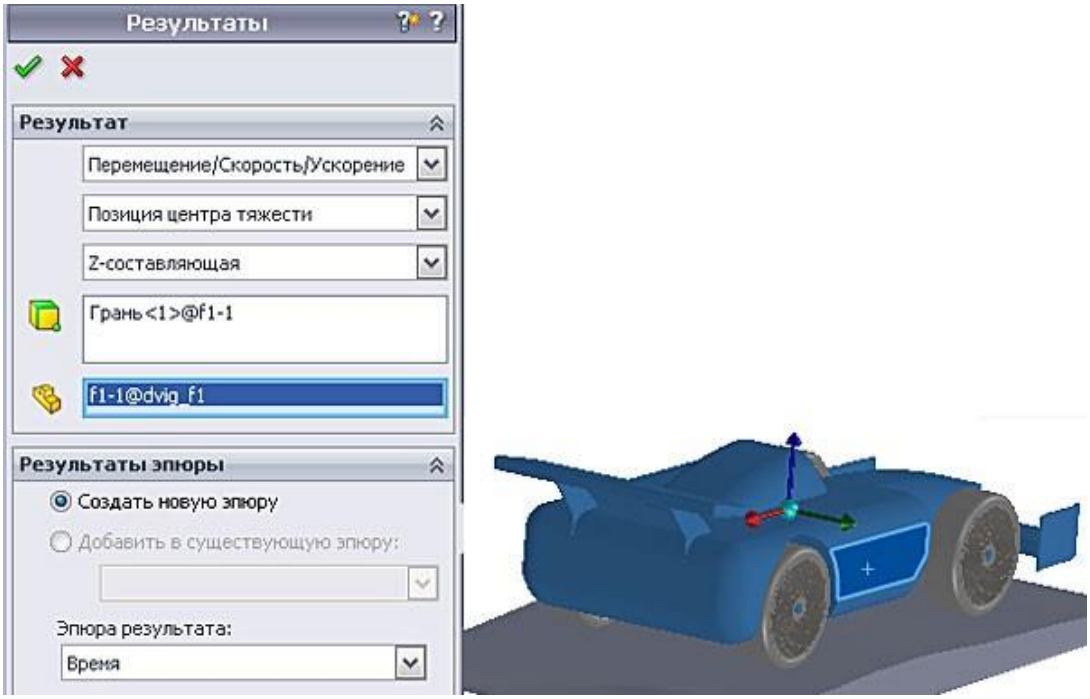


Рисунок 11 – Указание свойств характеристики движения

Результаты расчетов перемещения центра масс в вертикальной плоскости (ось Z) корпуса автомобиля (установка данных соответствует рисунку 11) показаны на рисунке 12. Здесь же показаны настройки вывода результата для скорости перемещения точки в левом нижнем углу стекла кабины (точка А) в вертикальной плоскости. Результирующая эпюра для этой характеристики показана на рисунке 13.

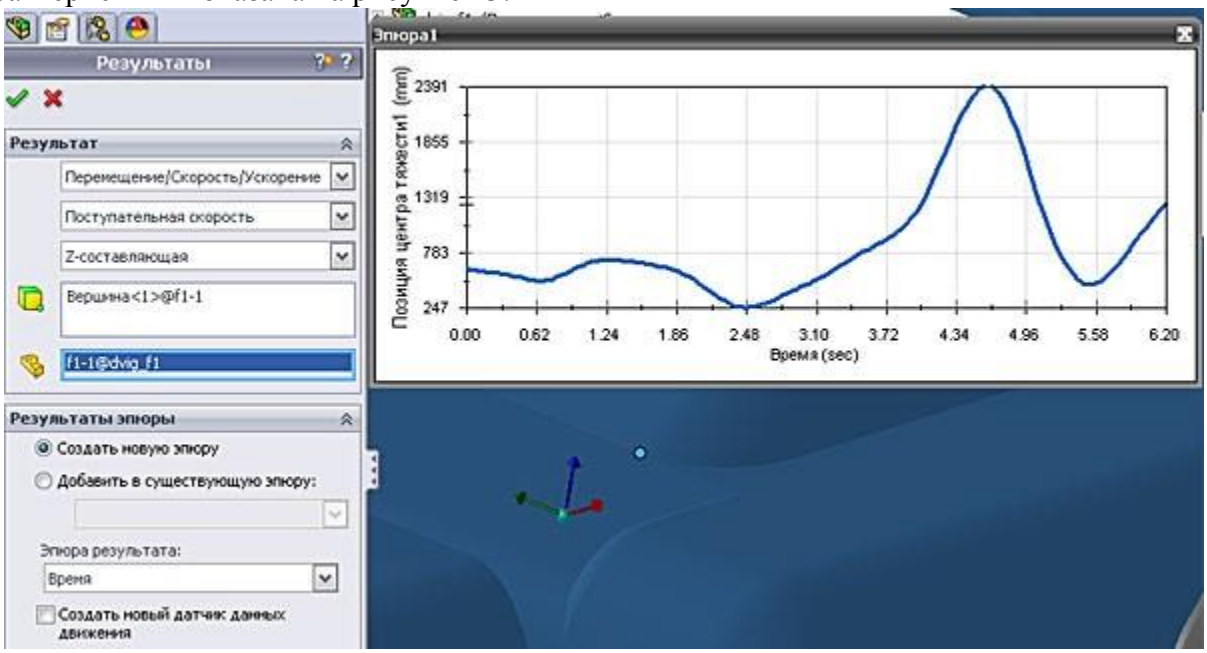


Рисунок 12 – Эпюра перемещения центра масс корпуса автомобиля в вертикальной плоскости

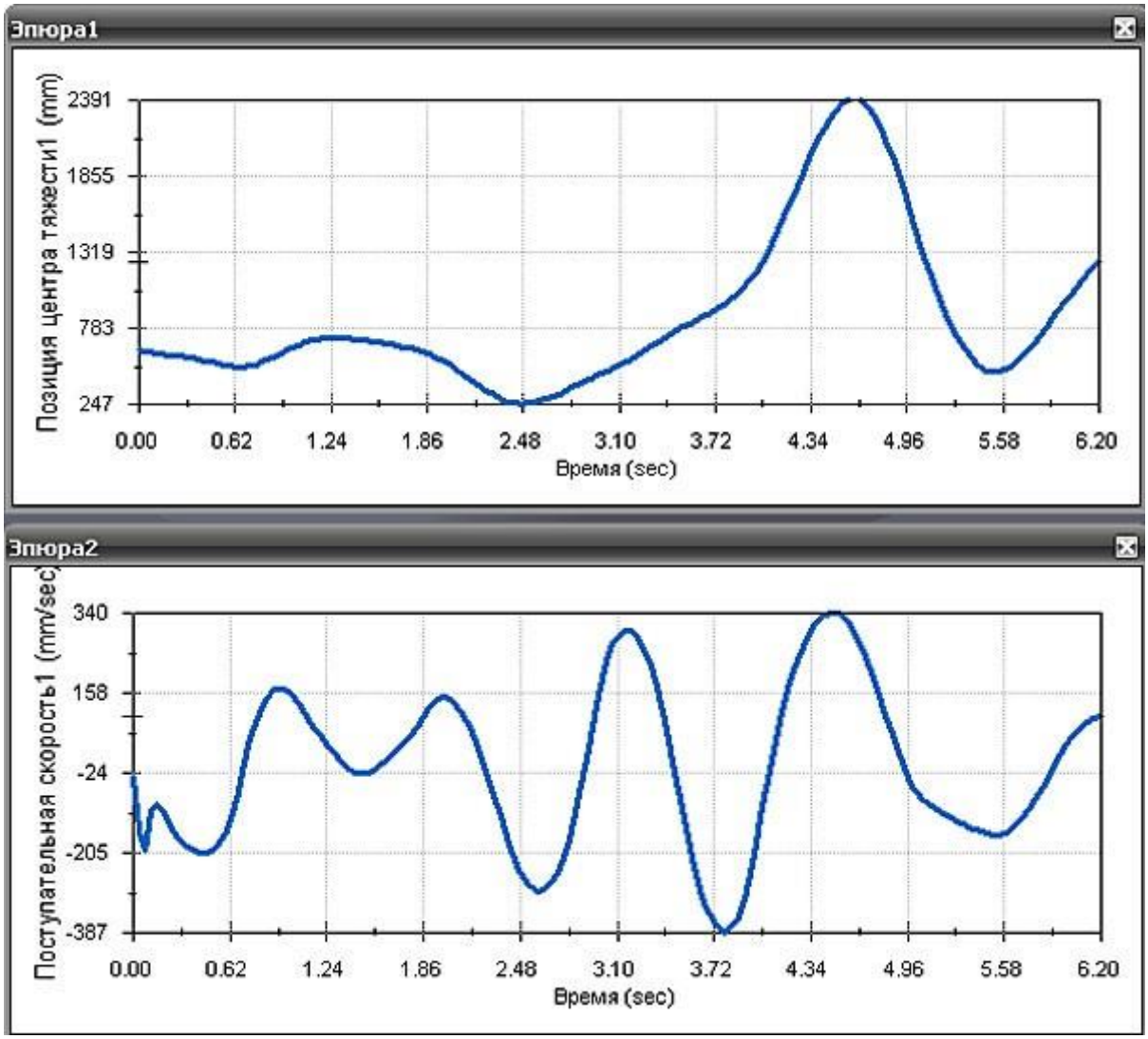


Рисунок 13 – Эпюры перемещения центра масс корпуса автомобиля и скорости перемещения точки А в вертикальной плоскости (ось Z)

Выводы:

1. В заданных условиях проведены исследования положение центра масс и скорость перемещения контрольной точки А спортивного автомобиля.
2. Получены эпюры демонстрирующие изменение исследуемых характеристик во времени.

ПРИМЕЧАНИЯ

1. Для проведения перестроений следует зафиксировать элемент, относительно которого исследуется движение (рисунок 14). Для рассматриваемого примера таким элементом является дорога.
2. Для указания степеней свободы элементов сборки следует скорректировать их сопряжения в окне анализа движения – установить локальные сопряжения (рисунок 15).
3. Для сохранения визуального представления результатов движения следует записать видеоролик, настроив его свойства (рисунок 16).

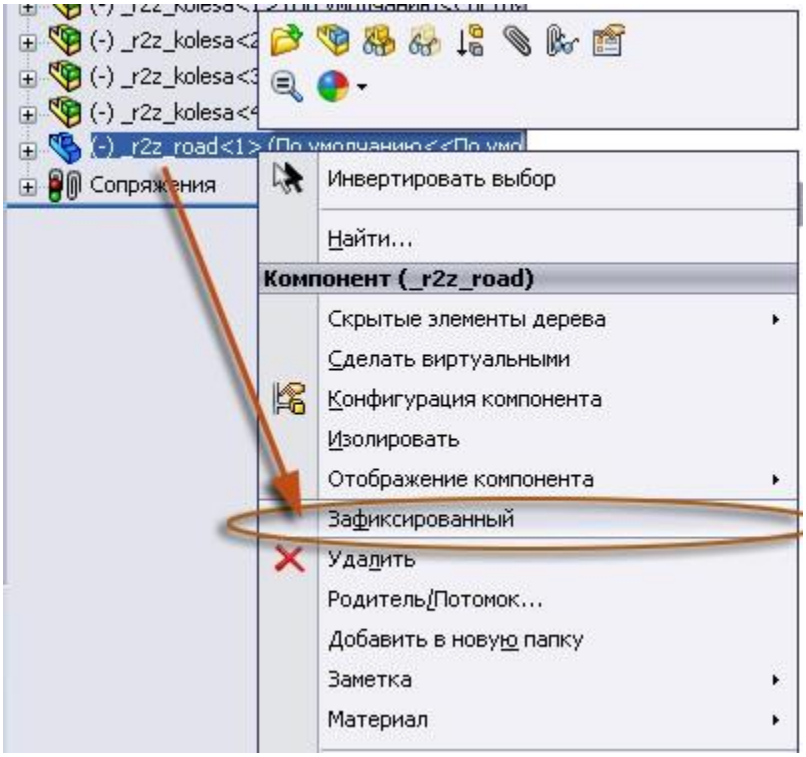


Рисунок 14 – Фиксация дороги как элемента сборки

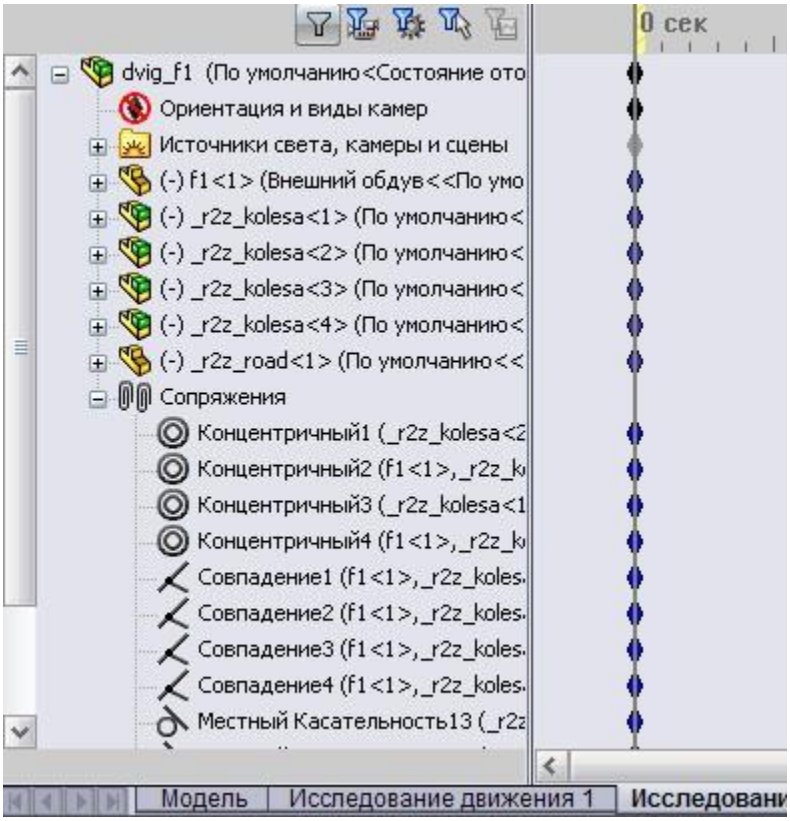


Рисунок 15 – Установка локальных сопряжений

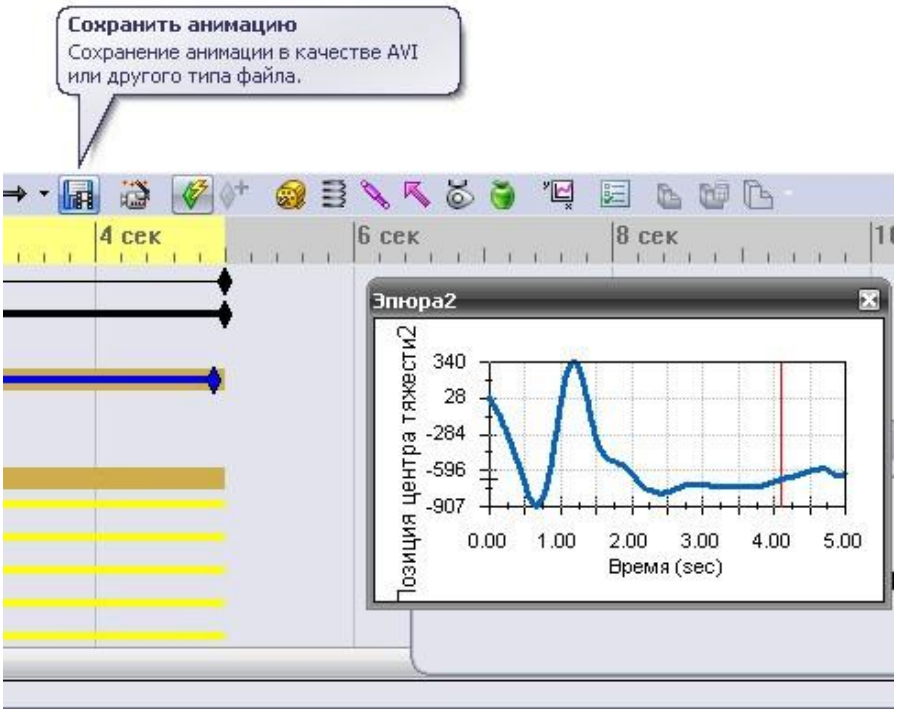


Рисунок 16 – Сохранение анимации

ЗАДАНИЕ

1. В условиях рассмотренного определить перемещения, скорости и ускорения точек, совпадающих с пересечением наружных плоскостей колес и их осей.
2. Расчеты провести для скоростей движения 1500 мм/с, 3500 мм/с.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие анализа движения конструкции.
2. Возможности модуля SolidWorks Motion.
3. Необходимые условия для исследования движения с использованием модуля SolidWorks Motion.
4. Порядок настройки анализа движения.
5. Порядок задания свойств движения для двигателя вращения.
6. Порядок задания свойств движения для линейного двигателя.
7. Порядок настройки свойств эпюр результатов.
8. Каким образом сохранить анимацию.
9. Положительные моменты работы в модуле SolidWorks Motion

ЛИТЕРАТУРА

1. Алямовский, А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. - СПб.: БХВ-Петербург, 2008. - 1040 с.
2. Алямовский, А.А. SolidWorks / COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. - М.: ДМК Пресс, 2004. - 432 с.
3. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004. - СПб.: Питер, 2005. - 768 с.
4. Прохоренко В.П. SolidWorks. Практическое руководство. - М.: ООО "Бином-Пресс", 2004. - 448 с.
5. Справочная система SolidWorks.

9. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ В СИСТЕМЕ SOLIDWORKS FLOW SIMULATION. ВНУТРЕННЕЕ ТЕЧЕНИЕ

Цель работы:
формирование и совершенствование практических навыков исследования автотракторной техники в среде SolidWorks Flow Simulation.

СПРАВКА

В процессе движения автомобиль испытывает воздействие набегающего потока воздуха, при этом часть этого потока используется для охлаждения систем автомобиля - радиатора, двигателя, тормозных элементов, салона и т.п.

Движение воздушного потока в подкапотном пространстве организуется определенным образом, обеспечивающим рациональное обтекание размещенных здесь элементов автомобиля.

Для оценки аэродинамических свойств автомобиля проводят натурные, модельные физические эксперименты, численное экспериментирование проводят в современных средах инженерного анализа.

Одним из инструментов анализа течений жидкостей и газов является SolidWorks Flow Simulation. Порядок исследования аэродинамических свойств автомобиля в этой среде может включать:

- задачи оценки внутреннего течения (Internal);
- задачи оценки внешнего течения (External);
- задачи комплексной оценки внутреннего и внешнего течений (External).

В основном порядок исследований сохраняется для всех типов, отличаясь очевидными нюансами, обусловленными физической природой исследуемой ситуации.

Порядок исследования внутреннего течения рассмотрим на примере оценки характеристик потока воздуха в пространстве корпуса спортивного автомобиля.

ПРИМЕР

Постановка задачи

Определить траекторию и скорость потока воздуха в пространстве корпуса спортивного автомобиля (рисунок 1), скорость, давления и температуру в заданной точке пространства, построить эпюры основных характеристик процесса для следующих условий:

- координаты точки 1: X = 4,5 м, Y = 0 м , Z = 0,64 м ;
- скорость движения автомобиля – 324 км/ч;
- атмосферные условия – норма.

Методические аспекты.

1. В мастере построения указываем тип задачи Internal (рисунок 2)
2. Строим область исследования (рисунок 3).
3. Задаем цели исследования (рисунок 4).
4. Реализуем расчет характеристик процесса.
5. Проводим построение эпюр.

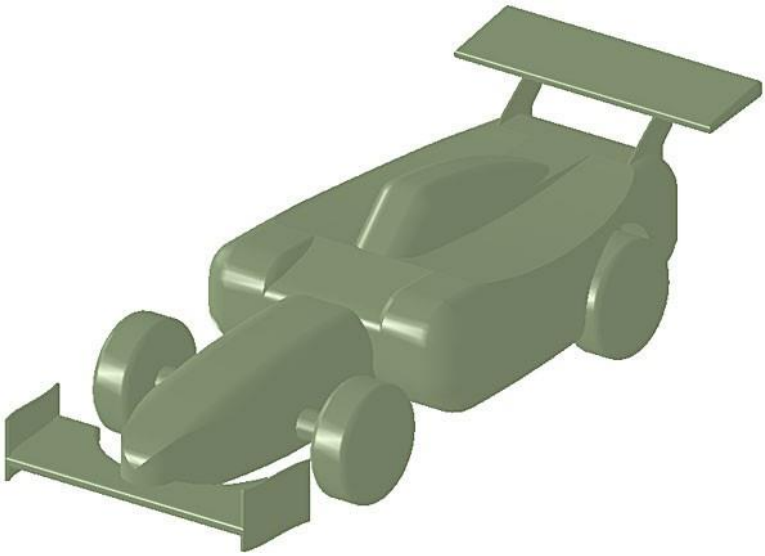


Рисунок 1 – Модель автомобиля

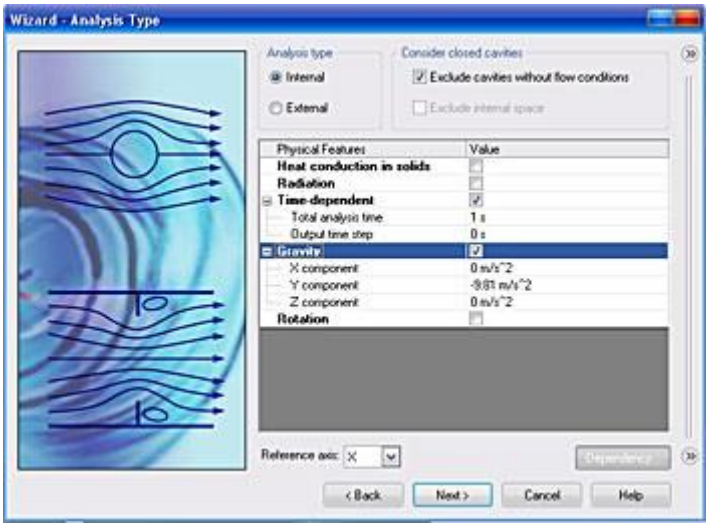


Рисунок 2 – Указание типа задачи анализа

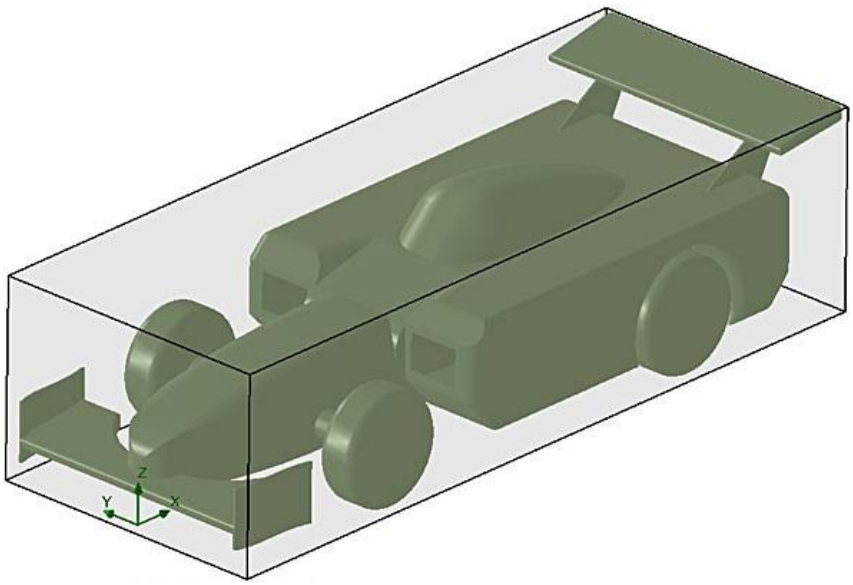


Рисунок 3 – Область исследования

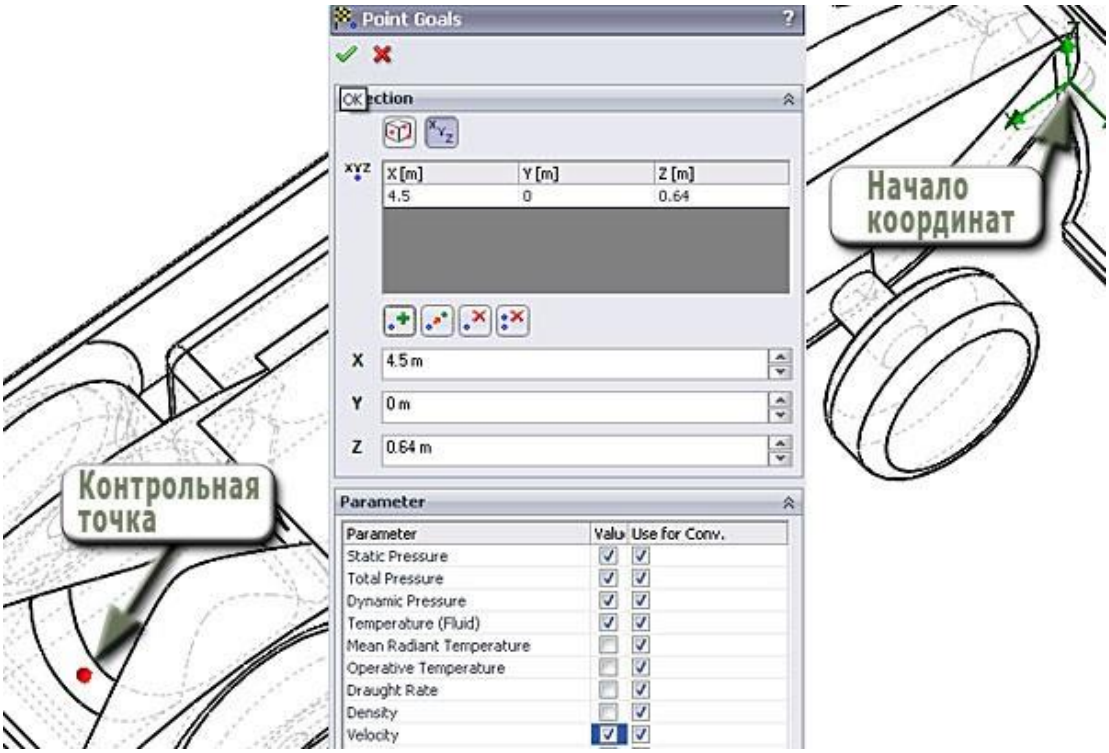


Рисунок 4 – Задание целей исследования

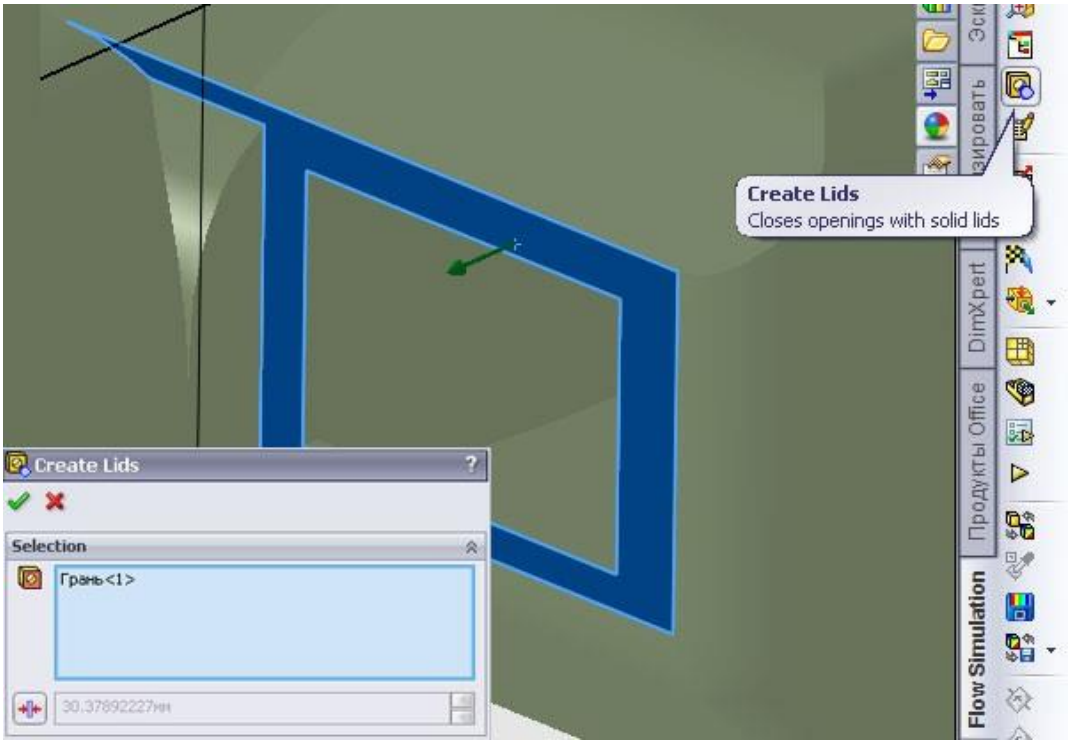


Рисунок 5 – Установка заглушек входных каналов потока

Аналогичным образом указываем второй канал входа. Данные операции можно объединят, если характеристики потоков для обоих каналов одинаковы.

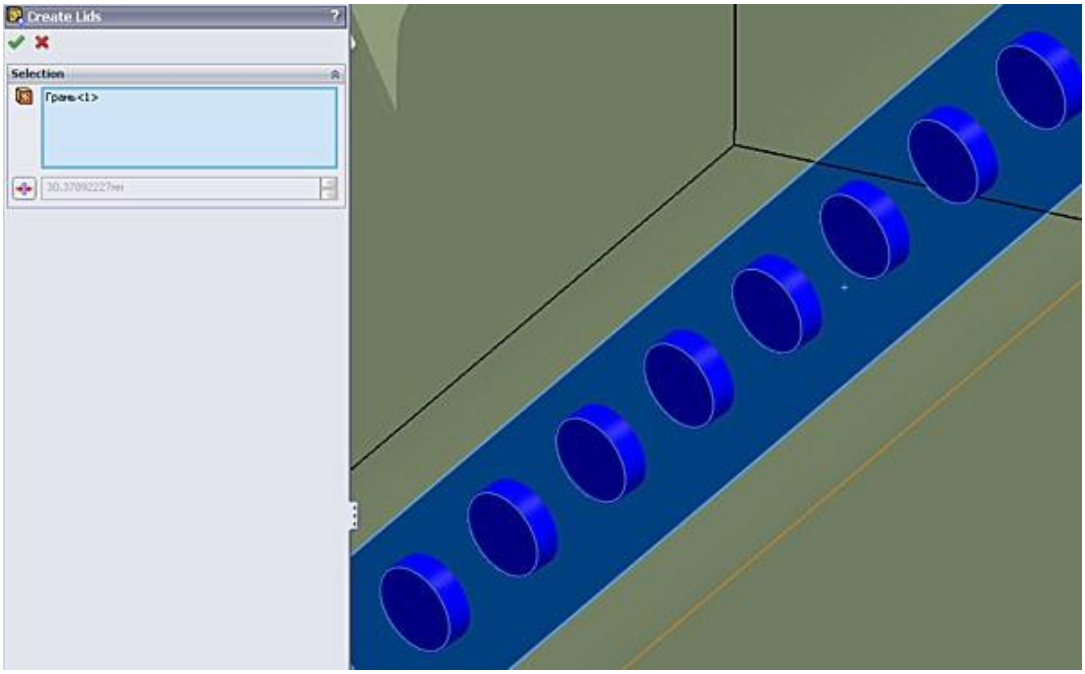


Рисунок 6 – Установка заглушек выходных каналов потока

Далее следует указать характеристики – граничные условия (рисунок 7) входного потока (рисунок 8) и характеристики на выходе (рисунок 9).

Рисунок 7 – Активация панели формирования граничных условий

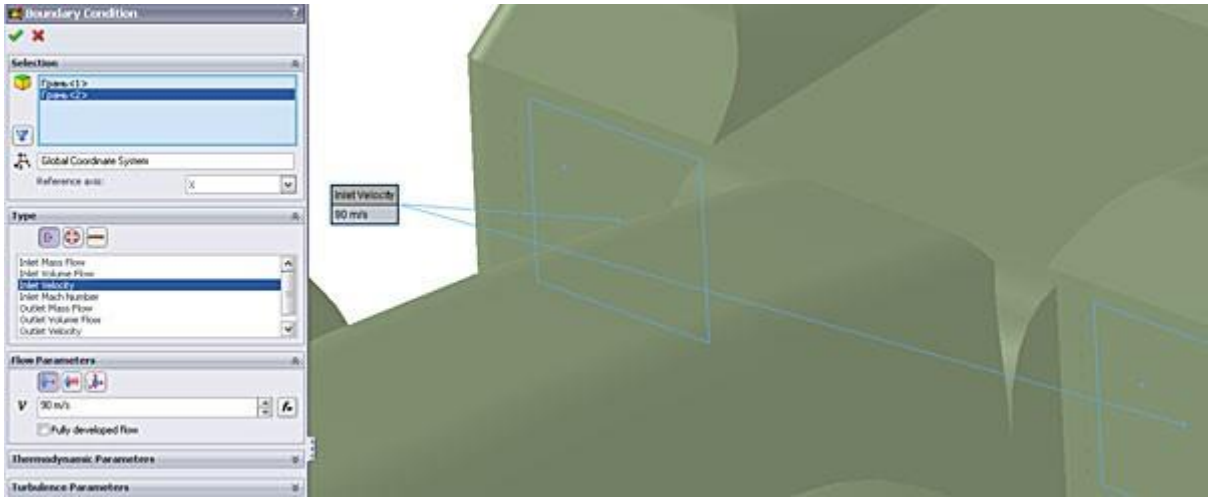


Рисунок 8 – Формирование граничных условий входа (скорость потока V = 90 м/с)

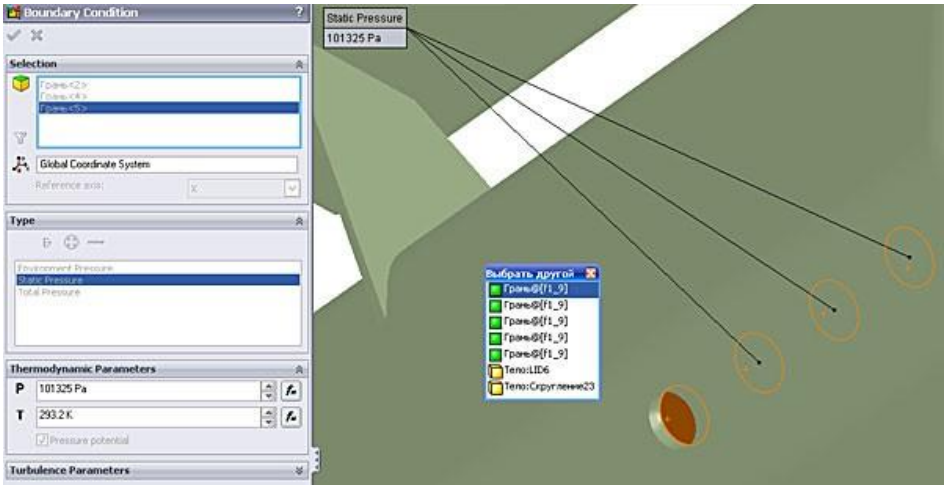


Рисунок 9 – Формирование граничных условий на выходе потока

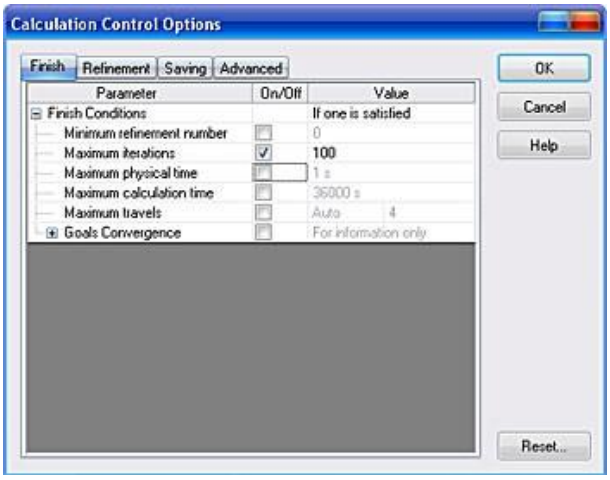


Рисунок 10 – Задание числа итераций для расчета процесса

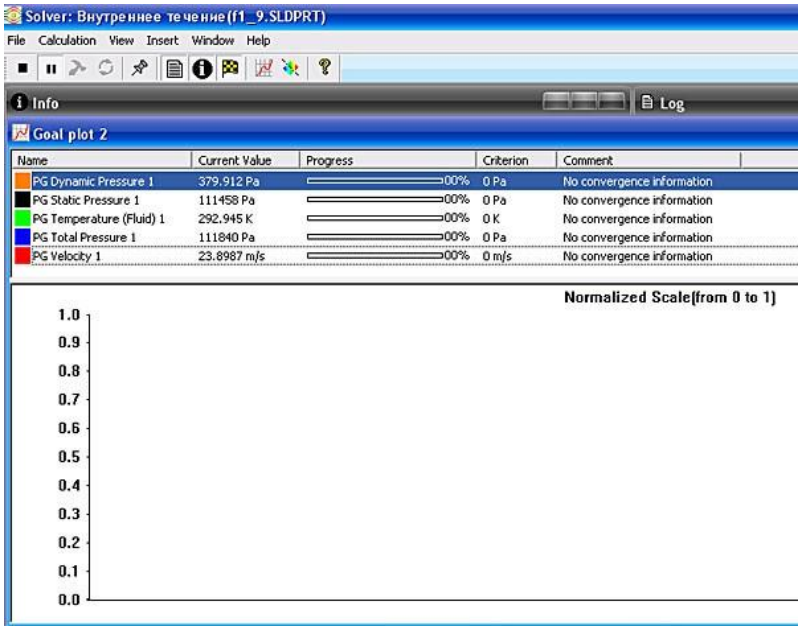


Рисунок 11 – Активация графика изменения характеристик процесса в контрольной точке

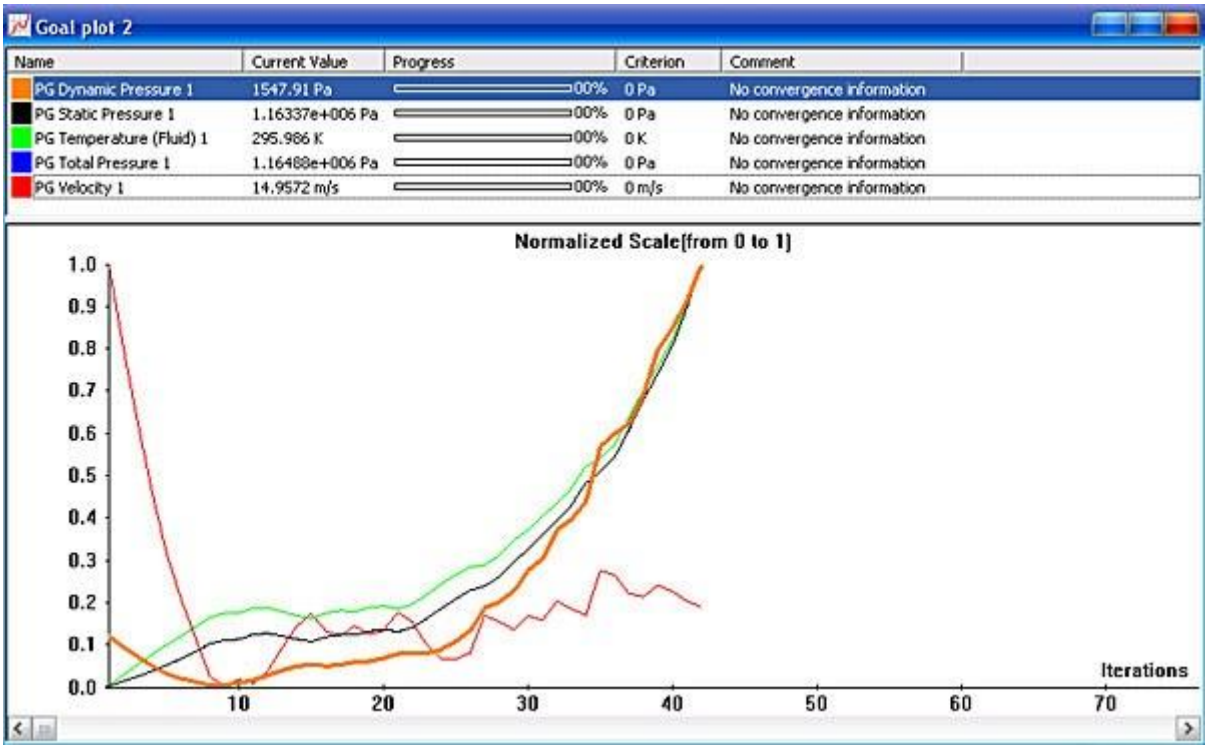


Рисунок 12 – Текущие значения характеристик процесса в контрольной точке

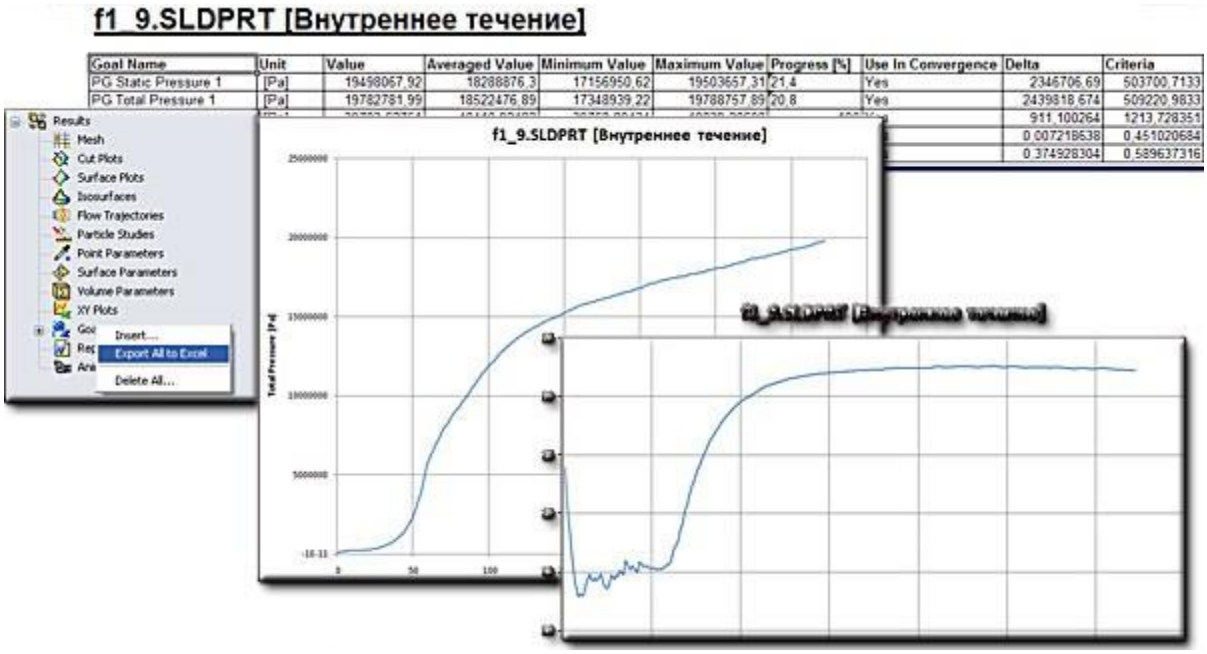


Рисунок 13 – Активация приложения MS Excel, построение графиков характеристик процесса в контрольной точке

Экспорт результатов расчетов для контрольной точки в приложение MS Excel обеспечивает детальную оценку всех зарегистрированных характеристик в зависимости от номера итерации или от реального времени процесса. На рисунке 13 показаны графики изменения температуры и скорости потока в контрольной точке.

На рисунках 14, 19 показаны эпюры скорости потока во внутренней полости автомобиля, обеспечивающие визуальный анализ его направлений и интенсивности.

На рисунке 20 показана эпюра температуры воздуха на поверхности с выходными каналами.

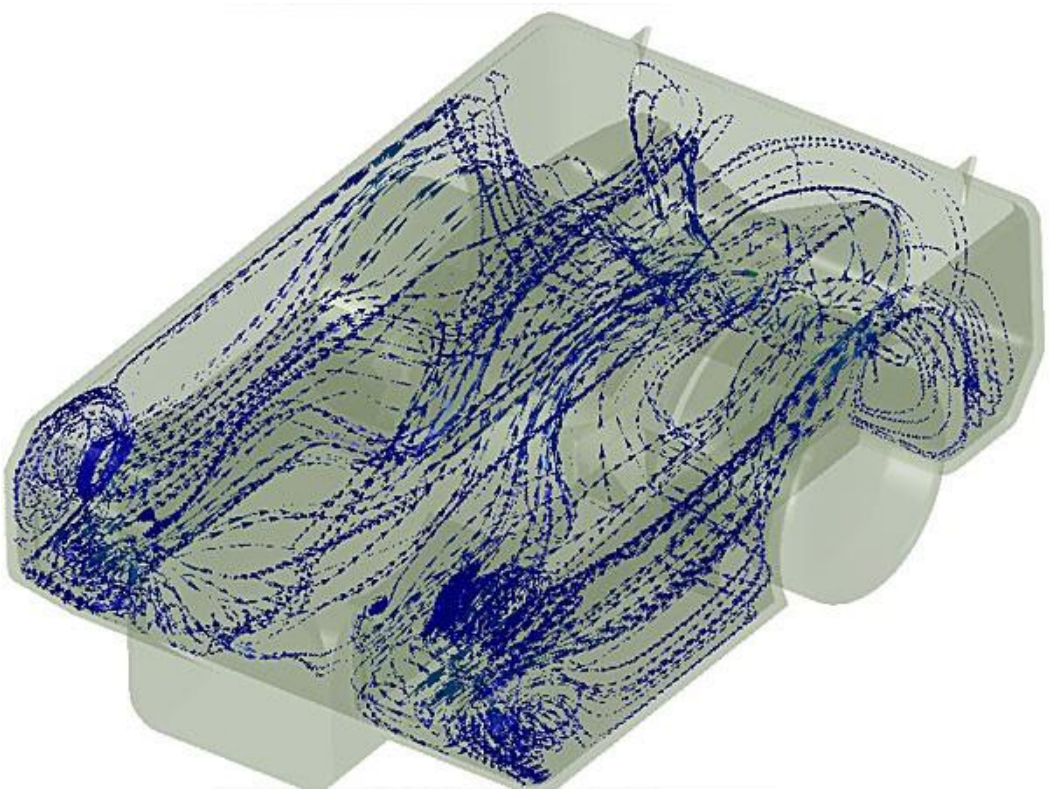


Рисунок 14 – Эпюра скорости потока воздуха

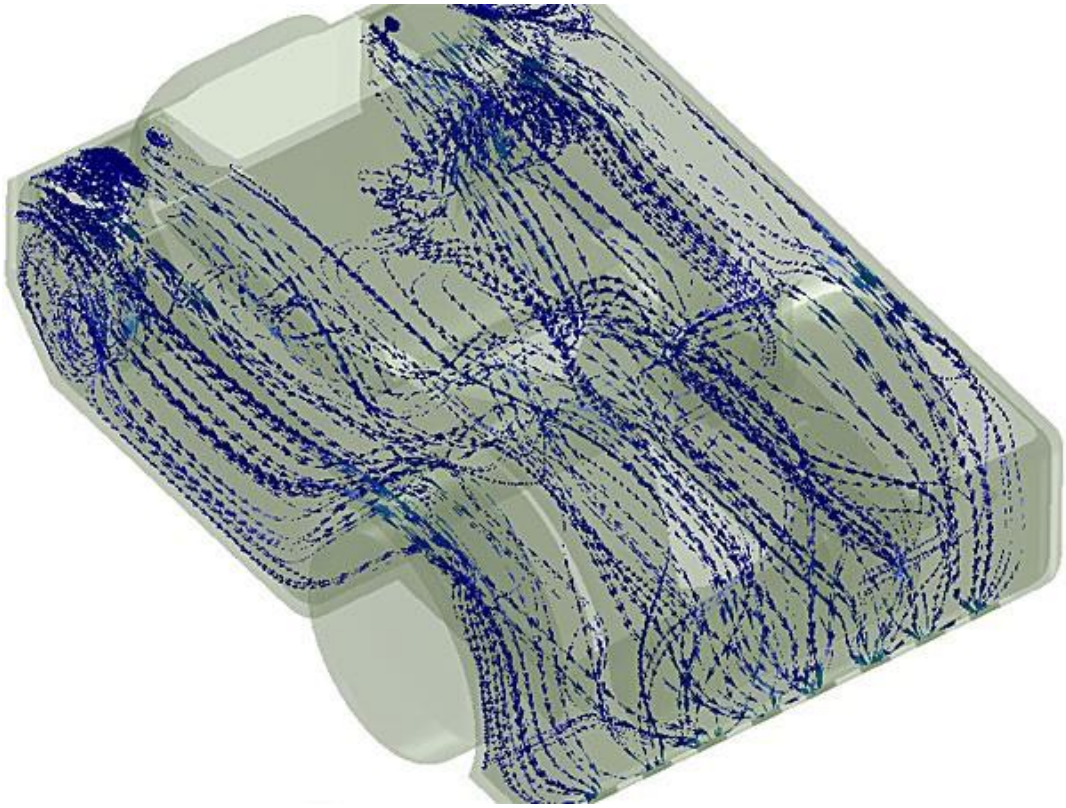


Рисунок 15 – Эпюра скорости потока воздуха

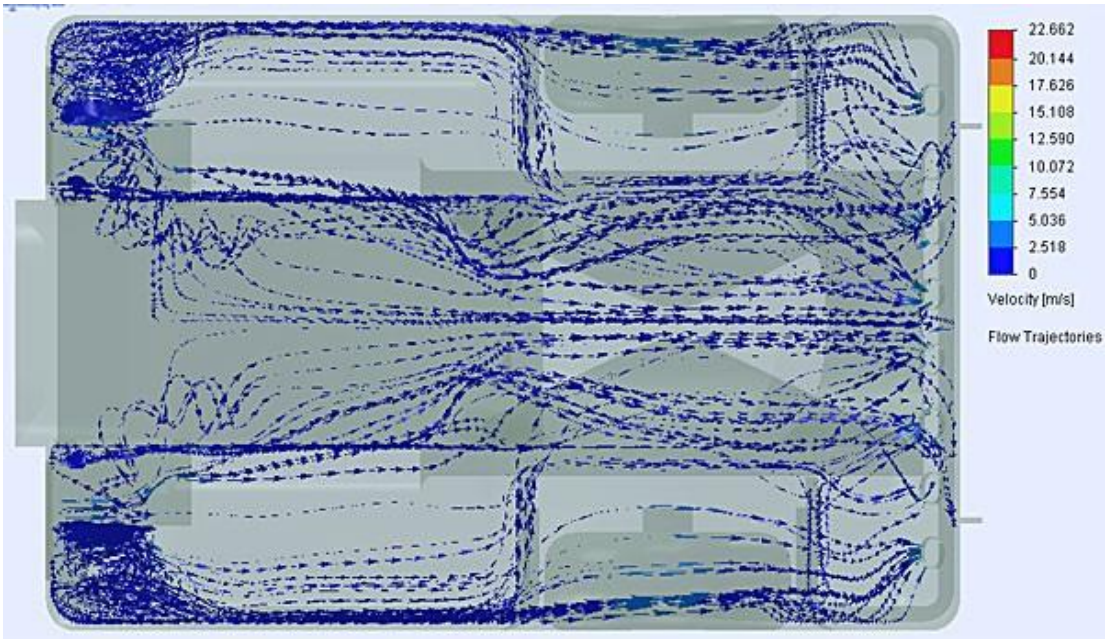


Рисунок 16 – Эпюра скорости потока воздуха

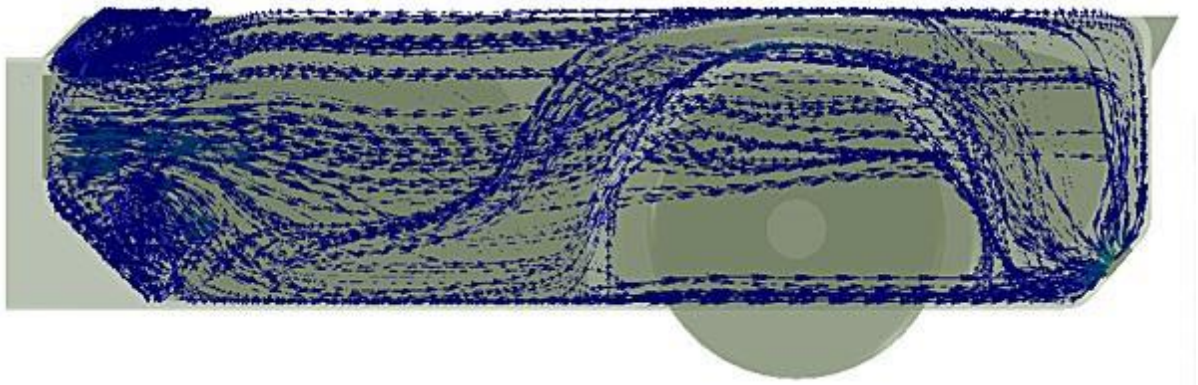


Рисунок 17 – Эпюра скорости потока воздуха

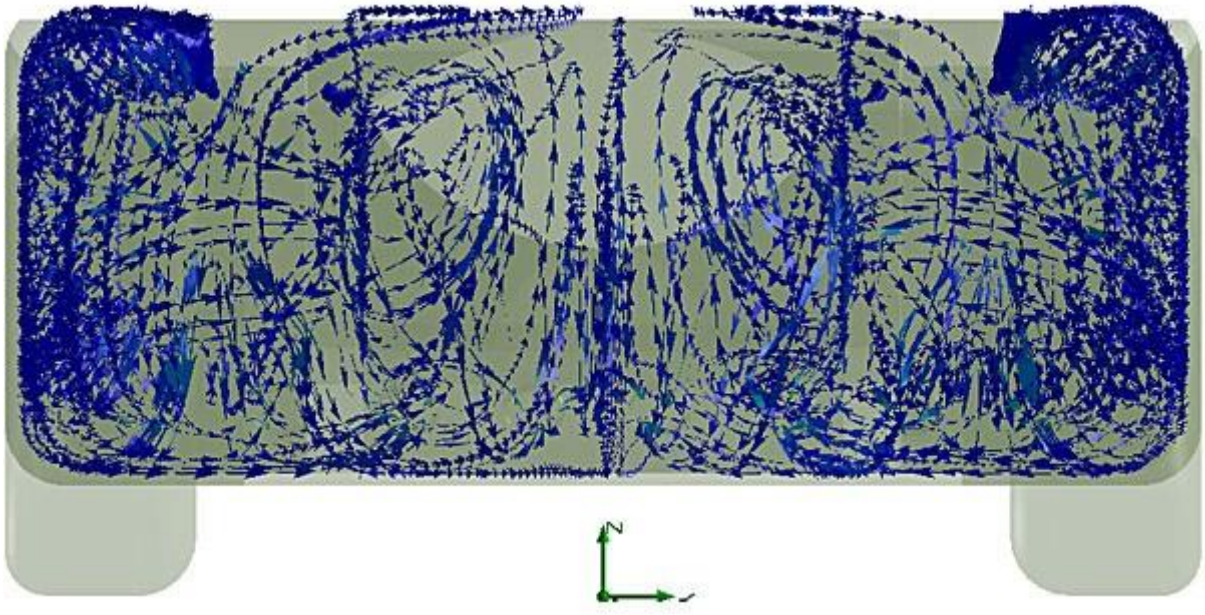


Рисунок 18 - Эпюра скорости потока воздуха. Вид спереди

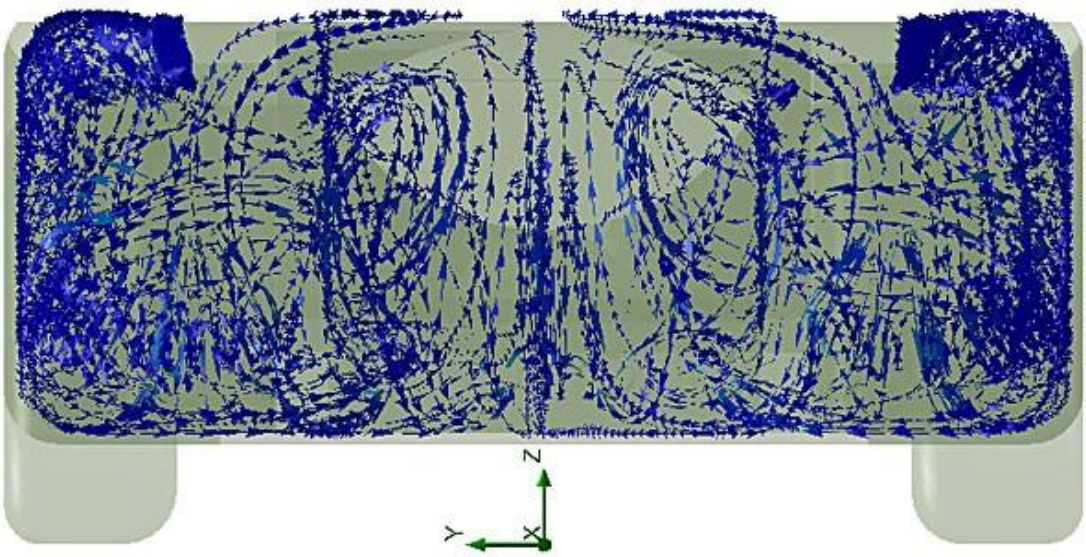


Рисунок 19 – Эпюра скорости потока воздуха. Вид сзади

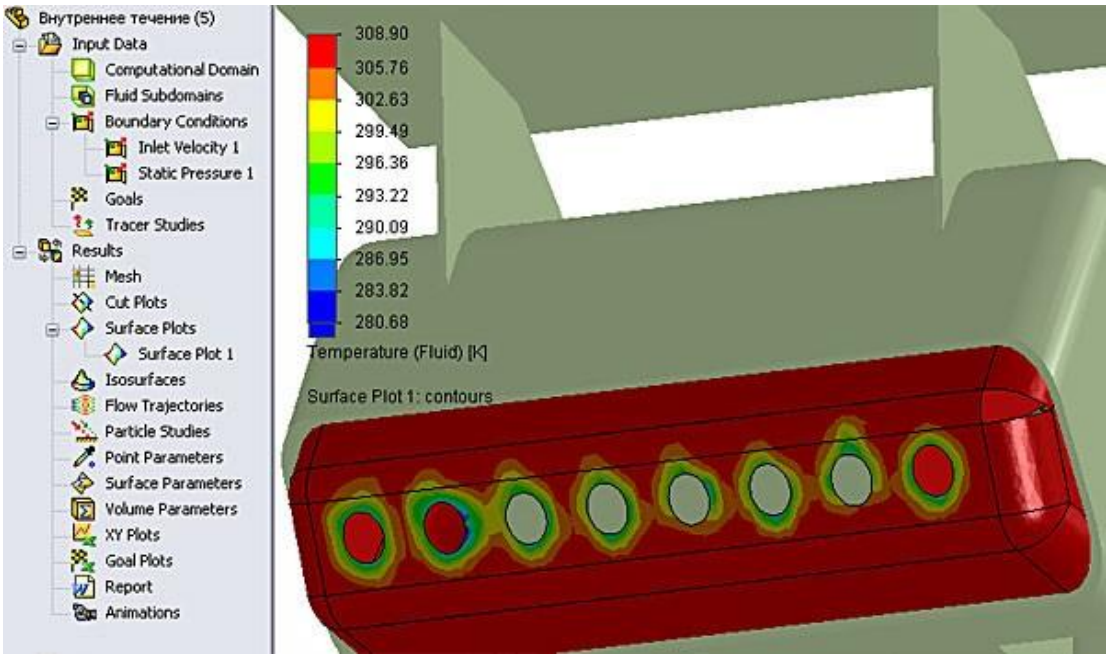


Рисунок 20 – Эпюра температуры воздуха на поверхности с выходными каналами

В программе имеется возможность настройки свойств информационной шкалы. Ля этого достаточно щелкнуть правой кнопкой мыши в поле шкалы (рисунок 21).

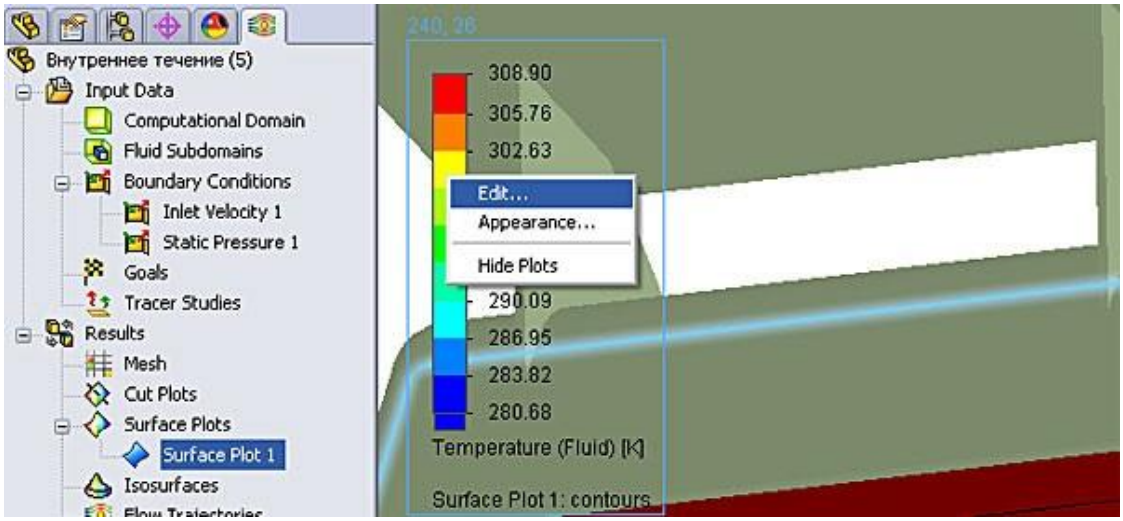


Рисунок 21 – Активация панели свойств информационной шкалы

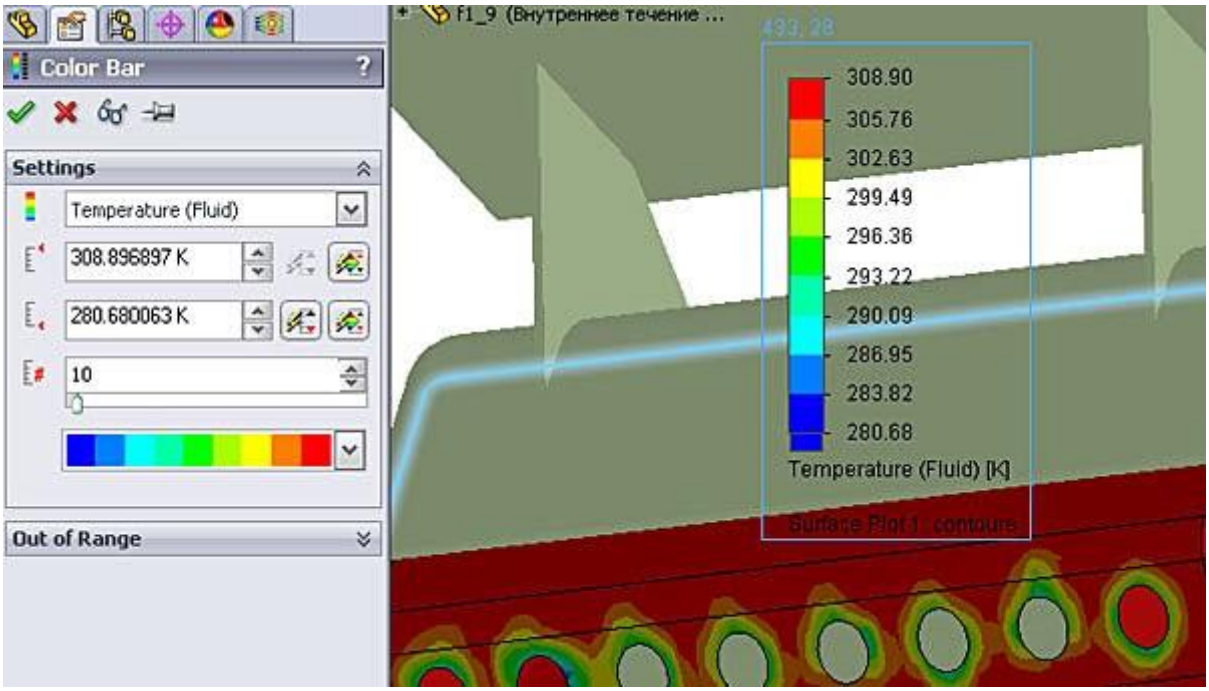


Рисунок 22 – Настройка диапазона индикации и шага цвета

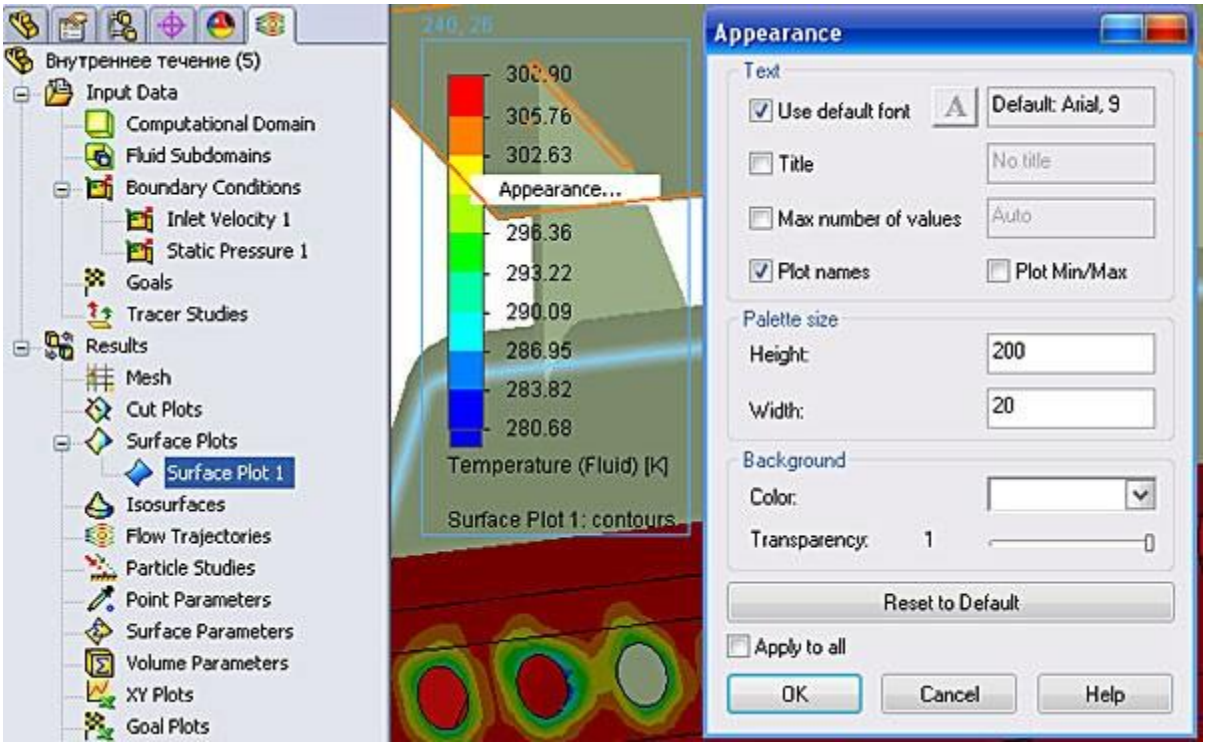


Рисунок 23 – Настройка установок вида информационной шкалы

Программа обеспечивает построение графиков изменения характеристик процесса для любого элемента конструкции. На рисунке 24 показано задание графиков изменения свойств потока по длине кромки центрального канала, а на рисунках 25, 26, 27 – представление результатов в MS Excel.

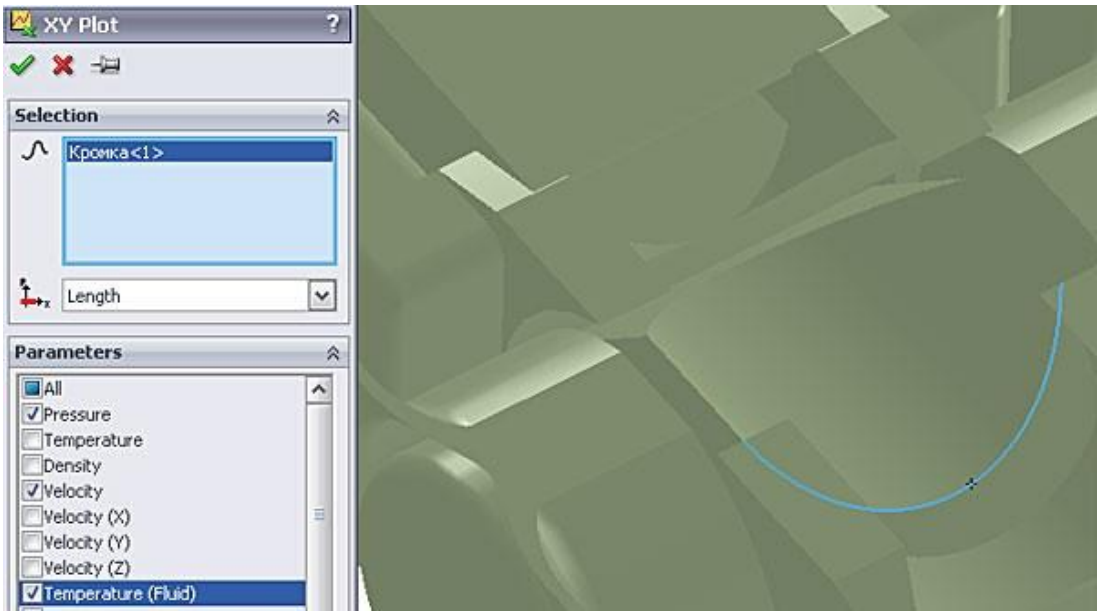


Рисунок 24 – Задание построения графика свойств потока

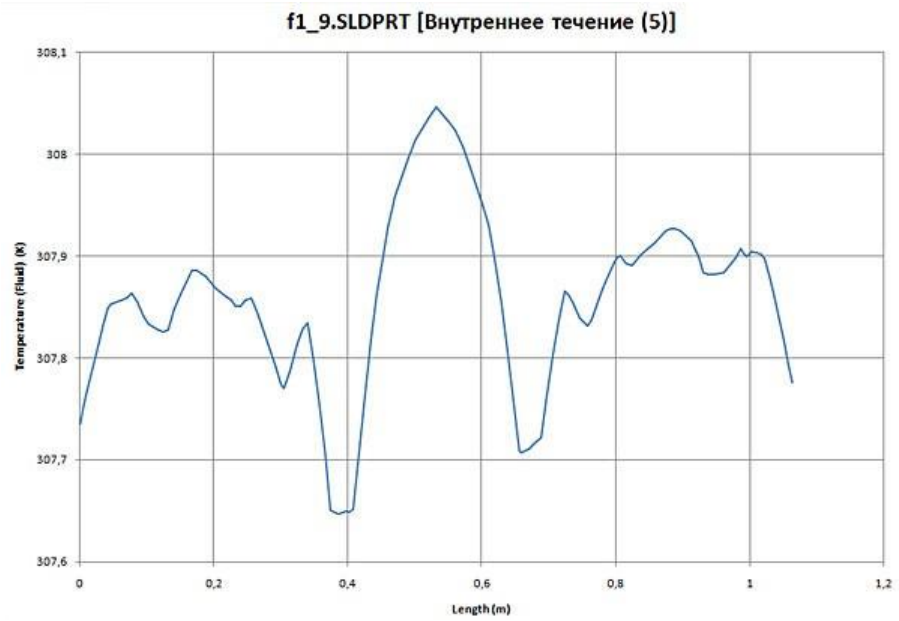


Рисунок 25 – Характер изменения температуры воздуха по длине кромки

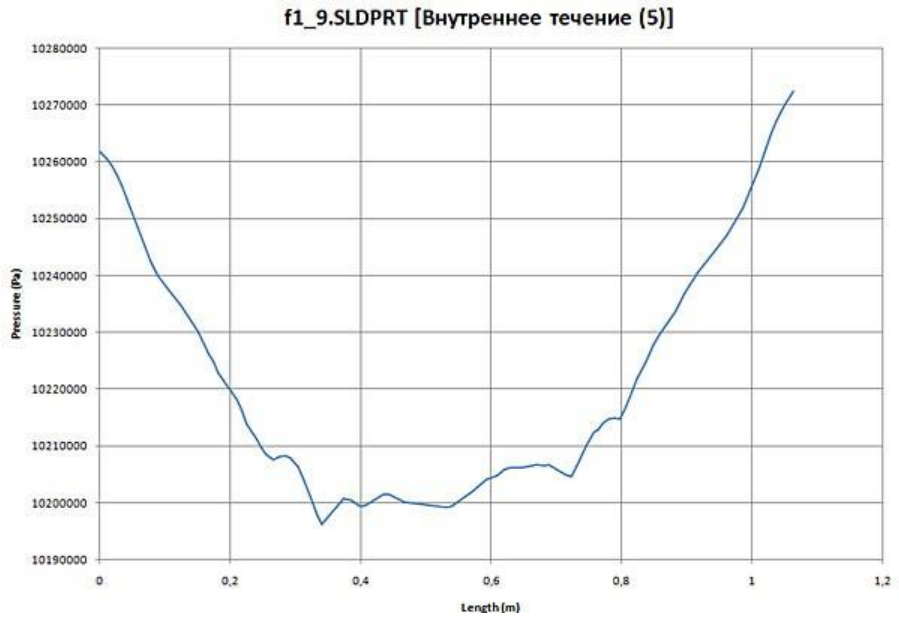


Рисунок 26 – Изменение давления воздуха по длине кромки

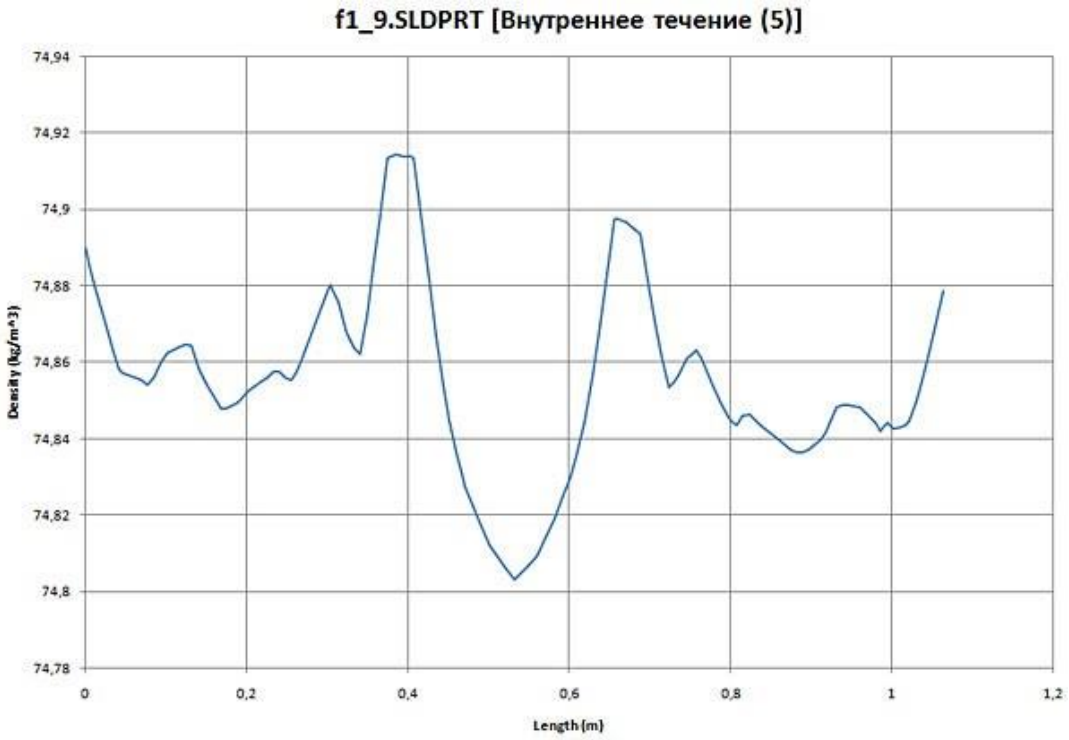


Рисунок 27 – Изменение плотности воздуха по длине кромки

Выводы

1. Поставлена и решена задача моделирования внутреннего течения для заданных условий исследования.
2. Получены результаты исследования, описывающие изменение характеристик потока воздуха.

ЗАДАНИЕ

1. В условиях примера провести исследование характеристик воздушного потока при скорости движения автомобиля V = 230,4 км/чс.
2. Составить отчет по результатам исследования.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение модуля SolidWorks Flow Simulation.
2. Возможности модулей SolidWorks Flow Simulation по исследованию внутренних течений в процессе проектирования изделий автомобилестроения.
3. Необходимые условия для решения задач исследования с использованием модуля SolidWorks Flow Simulation.
4. Порядок формирования проекта.
5. Задание целей исследования.
6. Настройка области исследования.
7. Настройка визуализации результатов исследования.
8. Положительные моменты работы в модуле SolidWorks Flow Simulation.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алямовский, А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной

практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. - СПб.: БХВ-Петербург, 2008. - 1040 с.
2. Алямовский, А.А. SolidWorks / COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. - М.: ДМК Пресс, 2004. - 432 с.
3. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004. - СПб.: Питер, 2005. - 768 с.
4. Прохоренко В.П. SolidWorks. Практическое руководство. - М.: ООО "Бином-Пресс", 2004. - 448 с.
5. Справочная система SolidWorks.

10. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ В СИСТЕМЕ SOLIDWORKS FLOW SIMULATION. ВНЕШНЕЕ ТЕЧЕНИЕ

Цель работы:
формирование и совершенствование практических навыков исследования автотракторной техники в среде SolidWorks Flow Simulation.

СПРАВКА

Автомобиль в движении испытывает воздействие множества силовых факторов, из которых четыре считаются основными: сопротивление воздуха, сопротивление качению, сопротивление подъему и инерционные силы. При этом наиболее значимыми являются первые две. Сила сопротивления качению автомобильного колеса в основном зависит от деформации шины и дороги в зоне контакта. Но уже при скорости движения 50-60 км/ч сила сопротивления воздуха превышает любую другую, а на скоростях свыше 70-100 км/ч превосходит их все вместе взятые.

Элементы кузова автомобиля оказывают различное влияние на процесс движения и характер взаимодействия с окружающим воздухом.

Передняя часть кузова. Экспериментами в аэродинамической трубе установлено, что для лучшей аэродинамики передняя часть кузова должна быть низкой, широкой и не иметь острых углов. В этом случае не происходит отрыва воздушного потока, что благотворно сказывается на обтекаемости автомобиля.

Решетка радиатора - элемент не только функциональный, но и декоративный. Радиатор и двигатель должны иметь эффективный обдув. Некоторые автоконцерны изучают эргономику и распределение воздушных потоков в подкапотном пространстве столь же серьезно, как и общую аэродинамику автомобиля.

Наклон ветрового стекла - яркий пример компромисса обтекаемости, эргономики и эксплуатационных качеств. Недостаточный его наклон создает излишнее сопротивление, а чрезмерный - увеличивает запыленность и массу самого стекла, в сумерках резко падает обзорность, требуется увеличить размеры стеклоочистителя и т.д. Переход от стекла к боковине должен осуществляться плавно, но излишняя кривизна стекла увеличивает искажение и ухудшает видимость.

Влияние стойки ветрового стекла на аэродинамическое сопротивление сильно зависит от положения и формы ветрового стекла, формы передка автомобиля. Определяя форму стойки, учитывают необходимость защиты передних боковых стекол от попадания дождевой воды и грязи, сдуваемой с ветрового стекла, поддержания приемлемого уровня внешнего аэродинамического шума и другие моменты.

Крыша. Увеличение выпуклости крыши может привести к уменьшению коэффициента аэродинамического сопротивления. Но значительное увеличение выпуклости может конфликтовать с общим дизайном автомобиля. Кроме того, если увеличение выпуклости сопровождается одновременным увеличением площади лобового сопротивления, то сила сопротивления воздуха возрастает. Если попытаться сохранить первоначальную высоту, то ветровое и заднее стекла должны будут внедряться в крыши, поскольку обзорность ухудшаться не должна. Это приводит к удорожанию стекол, уменьшение же силы сопротивления воздуха в этом случае не столь значительно.

Боковые поверхности. С точки зрения аэродинамики автомобиля боковые поверхности оказывают небольшое влияние на создание безвихревого потока. Стекла должны по возможности составлять единое целое с боковой поверхностью и располагаться на одной линии с наружным контуром автомобиля. Любые ступеньки и перемычки создают

дополнительные препятствия для прохождения воздуха, появляются нежелательные завихрения. Можно заметить, что водосточные желоба, которые ранее присутствовали практически на любом автомобиле, уже не используются. Появились иные конструктивные решения, не оказывающие большого влияния на аэродинамику автомобиля.

Задняя часть автомобиля оказывает наибольшее влияние на коэффициент обтекаемости. Это объясняется тем, что в задней части воздушный поток отрывается и образует завихрения. Заднюю часть автомобиля практически невозможно сделать такой же обтекаемой, как дирижабль (длина в 6 раз больше ширины). Поэтому над ее формой работают более тщательно.

Один из основных параметров - угол наклона задней части автомобиля. Считается, что для российского автомобиля "Москвич-2141" неудачное решение задней части значительно ухудшило общую аэродинамику автомобиля, хотя его заднее стекло всегда остается чистым. Много дополнительных навесных элементов делается именно на заднюю часть автомобиля: антикрылья, спойлеры и т.д. Наряду с углом наклона задней части на коэффициент аэродинамического сопротивления сильно влияет форма боковой кромки задней части автомобиля. Кузов современного автомобиля делают спереди шире, чем сзади для улучшения его обтекаемости.

Днище автомобиля. Эта часть кузова оказывает существенное влияния на аэродинамику. Различная компоновка элементов в нижней части кузова может приводить как к увеличению подъемной силы, так и к «прилипанию» автомобиля к дороге за счет разряжения воздуха. Все это сказывается на устойчивости автомобиля.

Воздушный поток, обтекающий автомобиль, неизбежно сталкивается с провалами, неровностями и стыками поверхностей. В том случае, если вслед за отрывом поток снова прилегает к поверхности, в промежутке возникают вихри. Такие вихри могут возникать в следующих местах: на передней кромке капота; сбоку на крыльях; в зоне, образованной пересечением капота и ветрового стекла; на переднем спойлере и, возможно, в зоне излома при ступенчатой форме задней части автомобиля.

Вихревой след за задней кромкой кузова является основным. Возникающая циркуляция воздуха в общем случае носит двухмерный характер, другими словами, вихри не хаотично "бурлят", а движутся вокруг оси параллельной задней кромке автомобиля или перпендикулярно набегающему потоку. Нижний вихрь вращается в направлении против часовой стрелки; именно он переносит частицы грязи на обратную сторону автомобиля. Верхний вихрь вращается в противоположную сторону, т.е. по часовой стрелке. По этой причине, задняя дверь хэтчбека или универсала загрязняется гораздо больше задней части седана или купе - большая равномерная площадь за линией отрыва создает гораздо более сильные вихревые потоки, которые поднимают грязь с поверхности. Величина вихревых потоков влияет на общую аэродинамику автомобиля. Так как набегающему воздуху приходится проходить прямо над вихрями, образованными нижним слоем, это увеличивает силу трения и, соответственно, коэффициент аэродинамического сопротивления автомобиля.

Для оценки аэродинамических свойств автомобиля проводят натурные, модельные физические эксперименты, численное экспериментирование проводят в современных средах инженерного анализа.

Одним из инструментов анализа течений жидкостей и газов является SolidWorks Flow Simulation. Порядок исследования аэродинамических свойств автомобиля практически не отличается от того, который реализован для анализа течений в ограниченных объемах.

ПРИМЕР

Постановка задачи

Определить характер изменения скорости, давления и температуры в заданных точках пространства за спортивным автомобилем (рисунок 1), построить эпюры основных характеристик процесса обдува автомобиля для следующих условий:

- координаты точки 1: X = , Y = , Z = ;
- координаты точки 2: X = , Y = , Z = ;
- скорость движения автомобиля – 230,4 км/ч;
- атмосферные условия – норма.

Методические аспекты.

1. В мастере построения указываем тип задачи External (рисунок 2)
2. Строим область исследования (рисунок 3).
3. Задаем цели исследования (рисунок 4).
4. Реализуем расчет характеристик процесса.
5. Проводим построение эпюр.

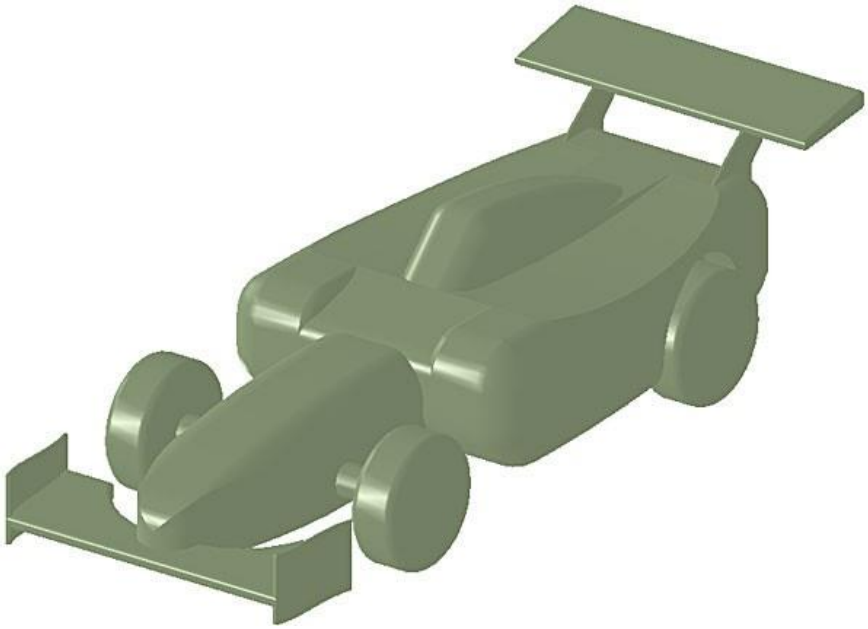


Рисунок 1 – Модель автомобиля

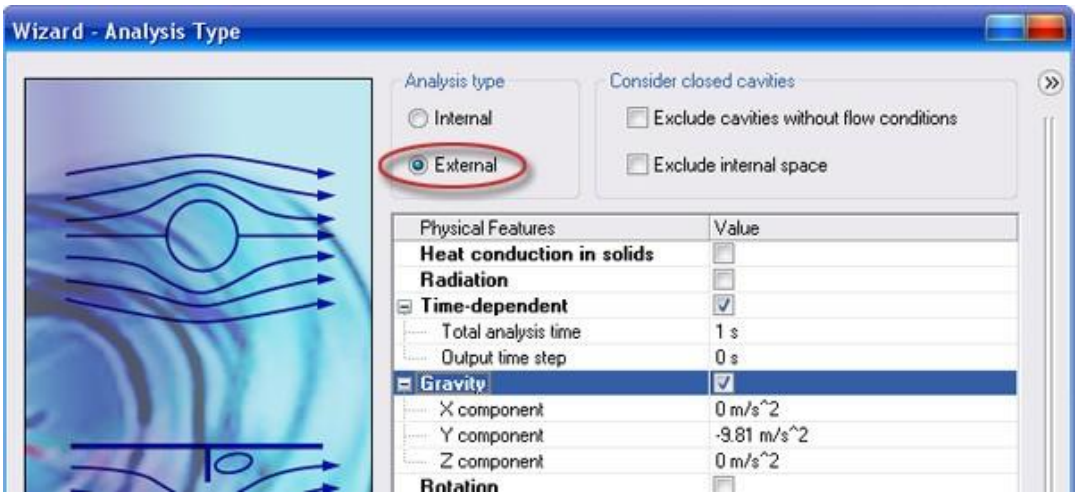


Рисунок 2 – Указание типа задачи анализа

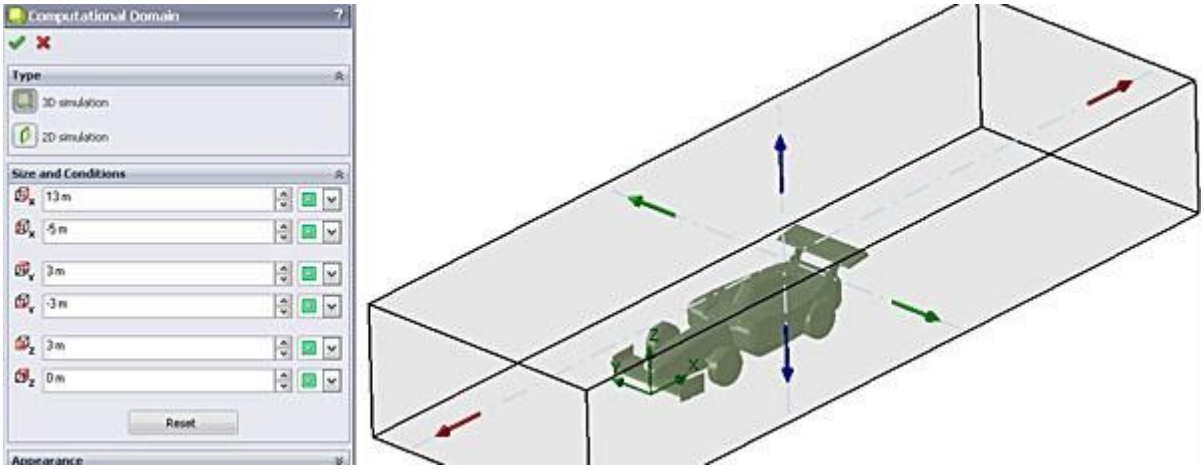


Рисунок 3 – Область исследования

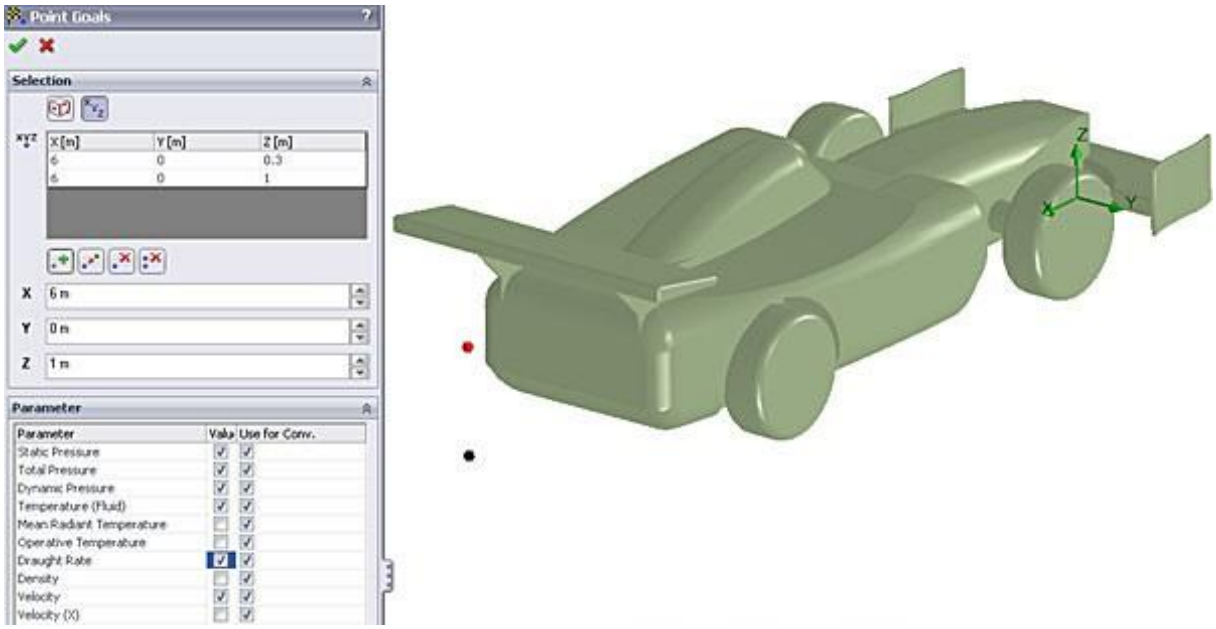


Рисунок 4 – Задание целей исследования

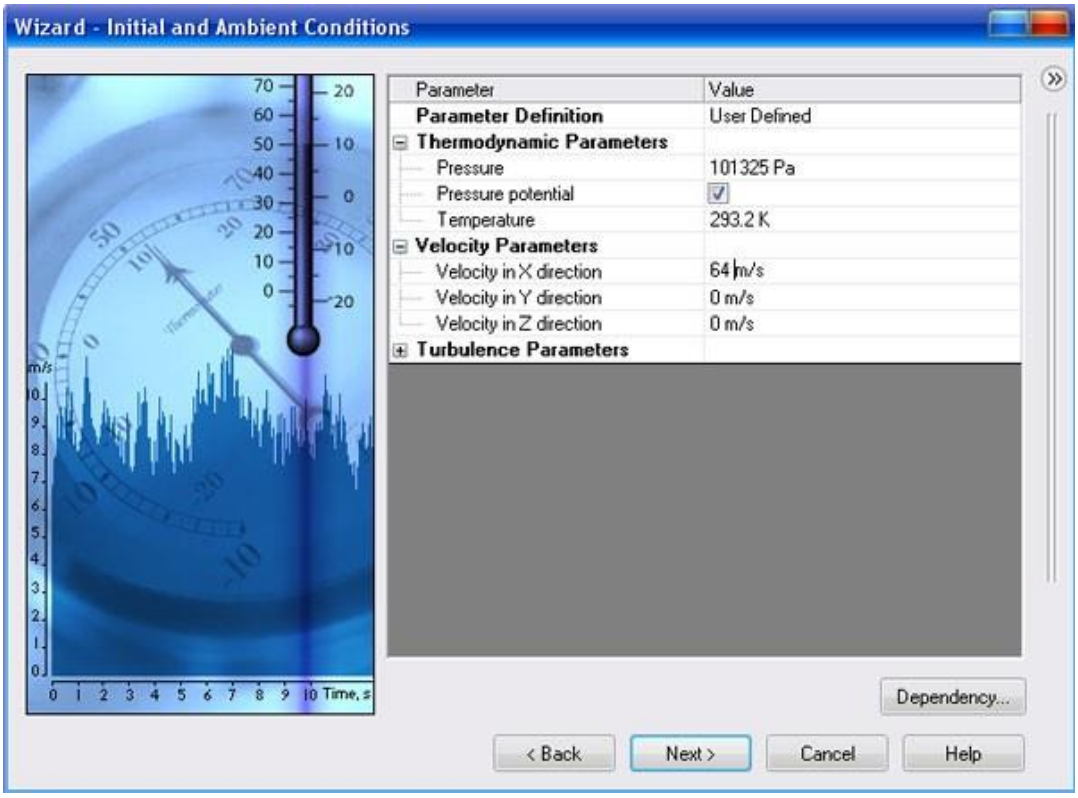


Рисунок 5 – Задание скорости движения

Расчет характеристик процесса проводим для 70 итераций (рисунок 6).

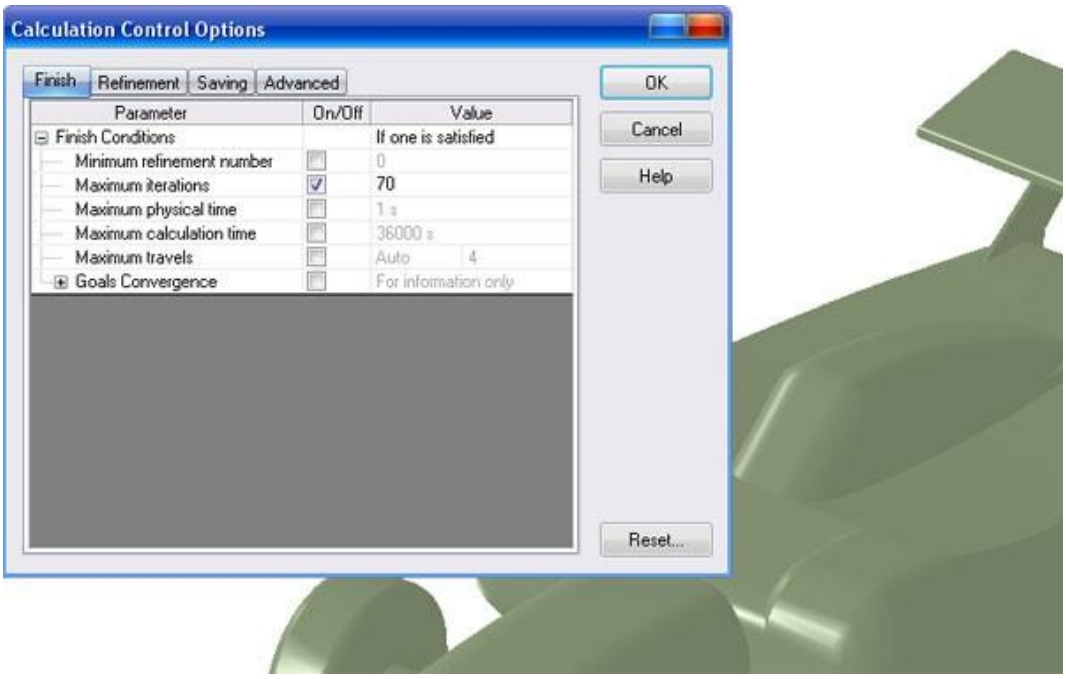


Рисунок 6 – Назначение числа итераций

В решателе проводим настройку визуализации текущих значений характеристик процесса (рисунок 7), графика изменения характеристик процесса (рисунки 8, 9), настройку регистрации текущих значений в виде изображений (рисунки 10… 13).

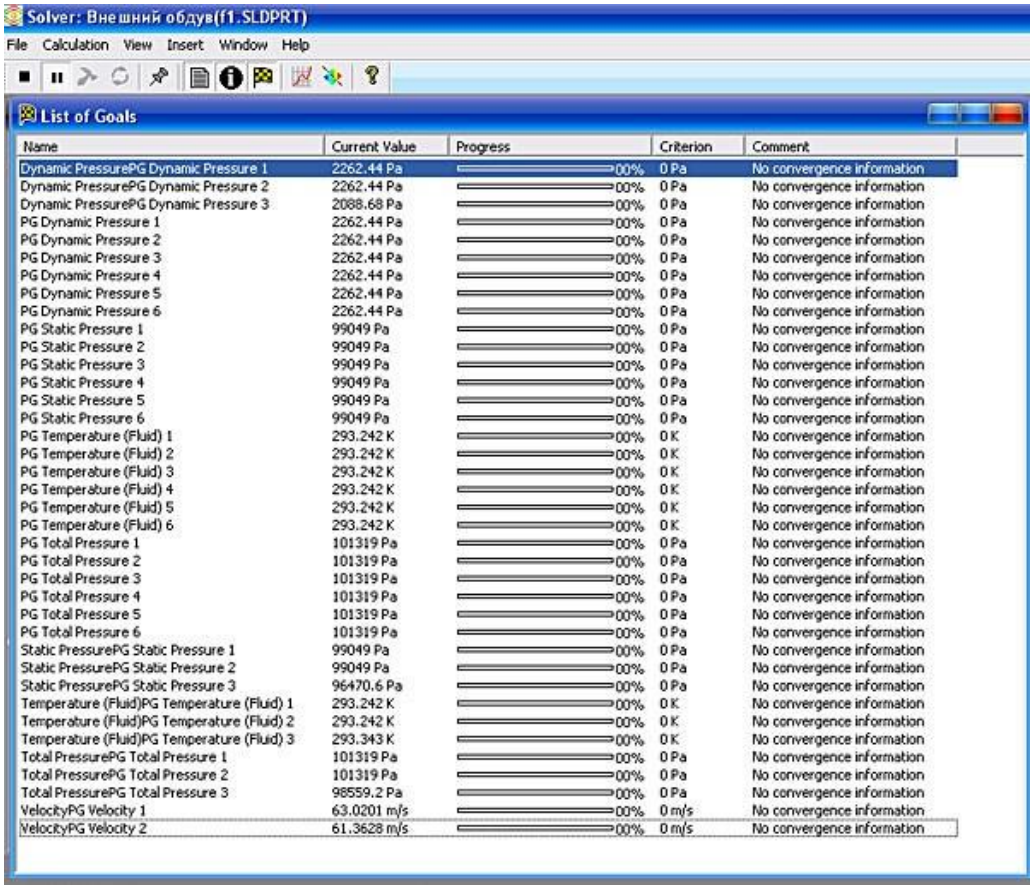


Рисунок 7 – Текущие значения характеристик процесса

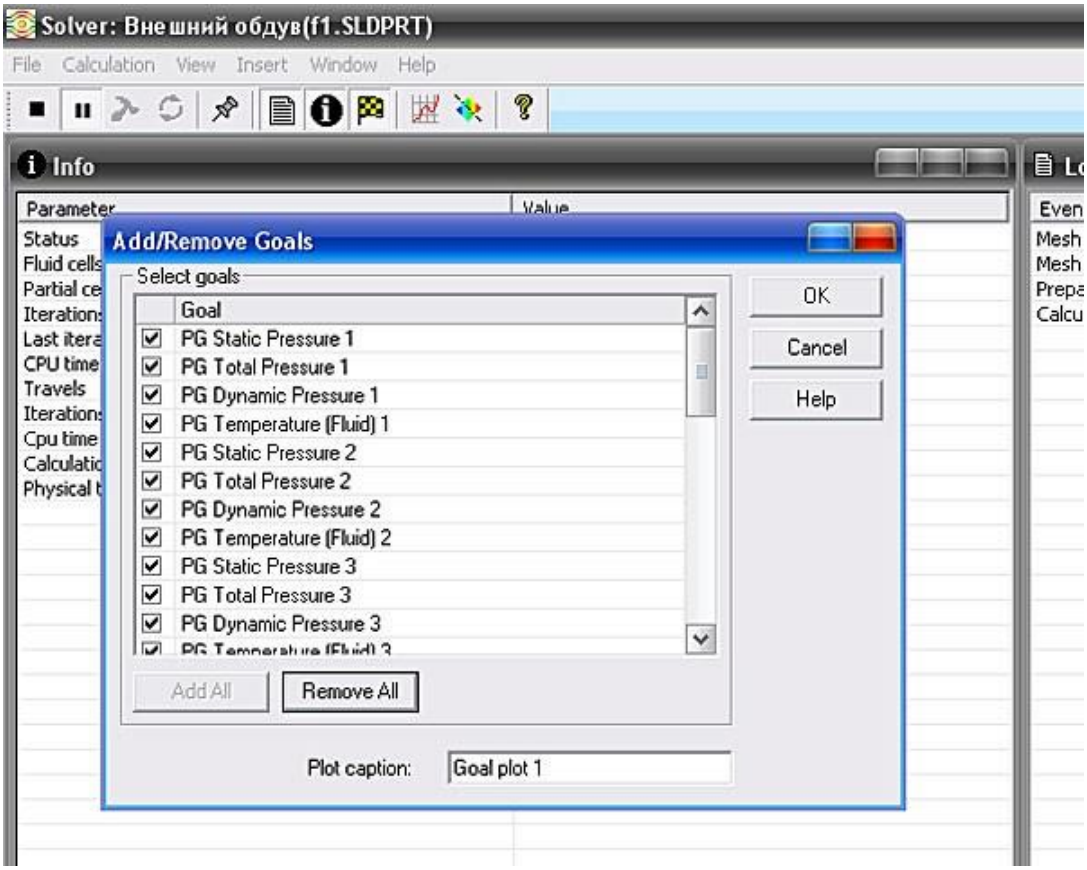


Рисунок 8 – Настройка визуализации графика изменения характеристик

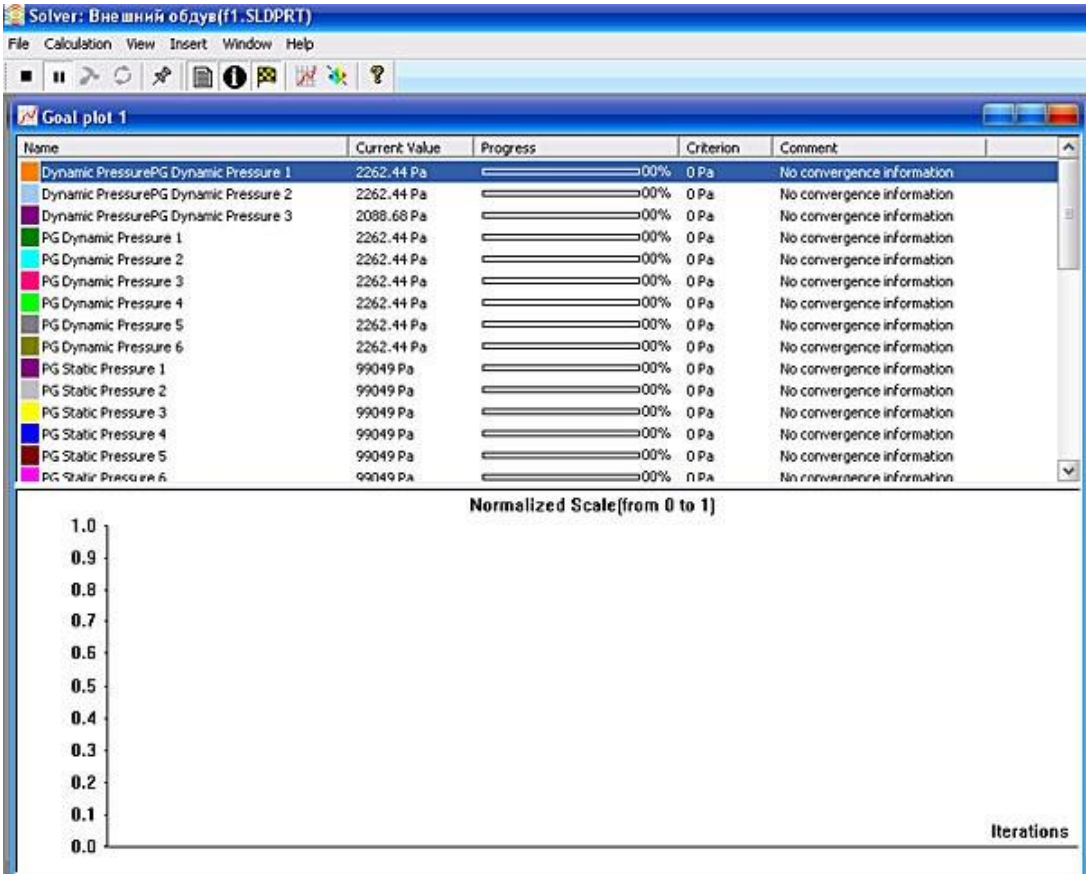


Рисунок 9 – Результат настройки

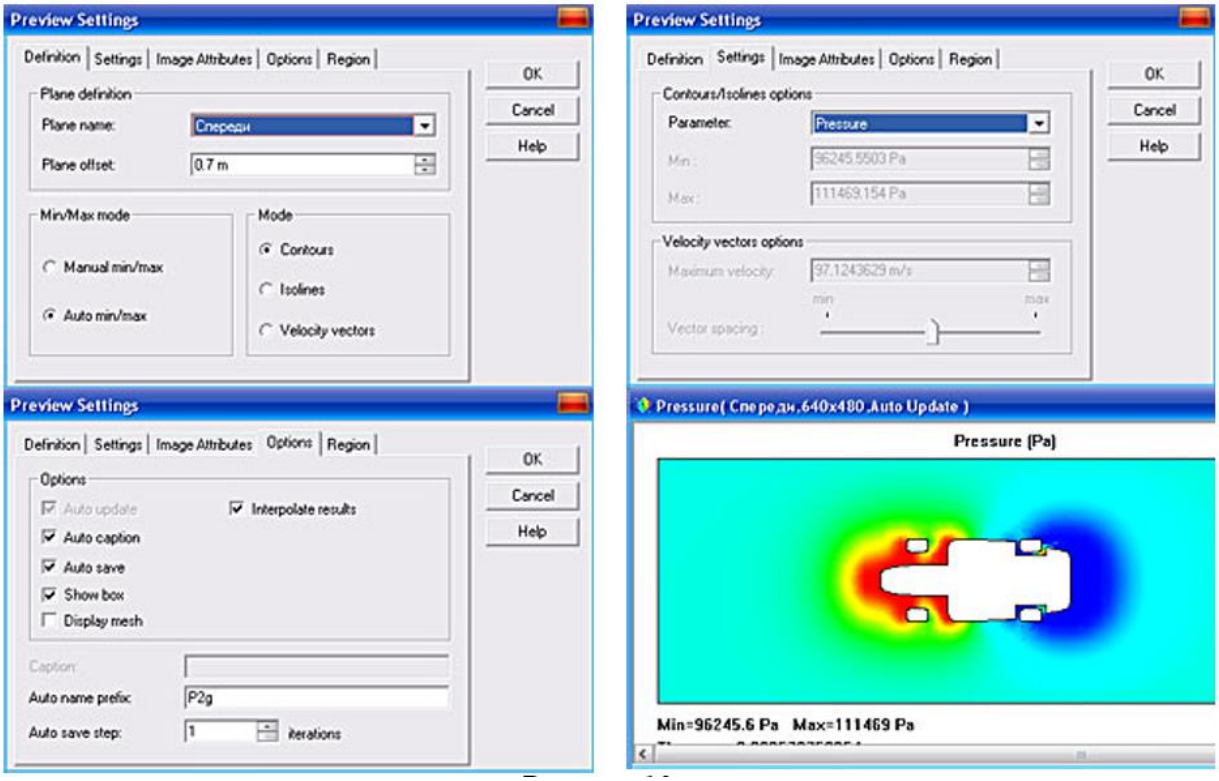


Рисунок 10 – Результат расчётов

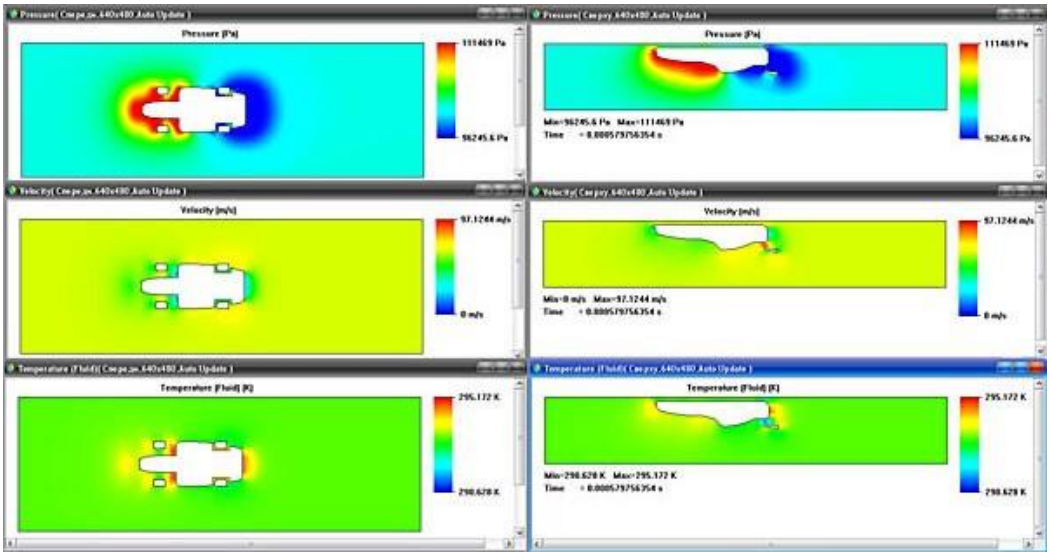


Рисунок 11 – Эпюры расчётов

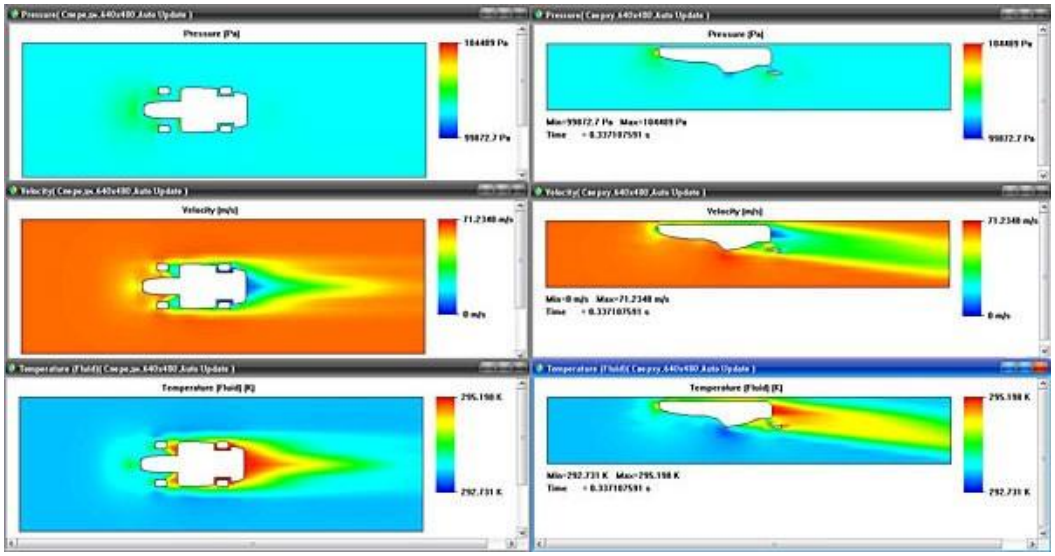


Рисунок 12 – Эпюры расчётов

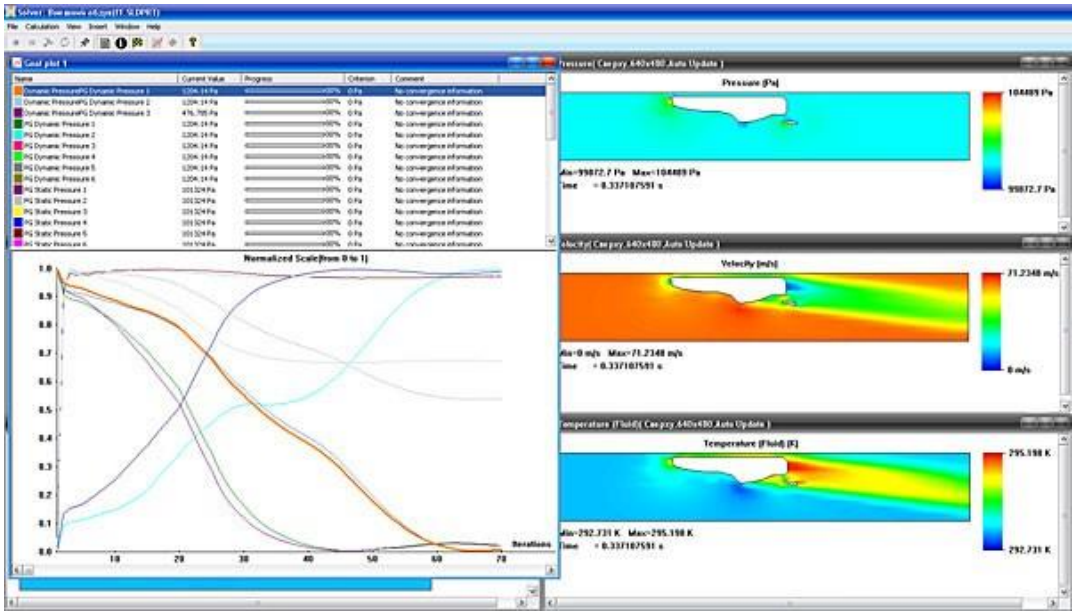


Рисунок 13 – Графики расчётов

Экспорт результатов расчетов в контрольных точках 1, 2 показан на рисунке 14, а сами результаты – на рисунках 15, 16, 17. На рисунках 18, 19 показан характер изменения температуры и давления воздуха на поверхности автомобиля.

На рисунке 20 показана эпюра температуры воздуха в центральной вертикальной плоскости.

Рисунок 14 – Экспорт результат в MS Excel

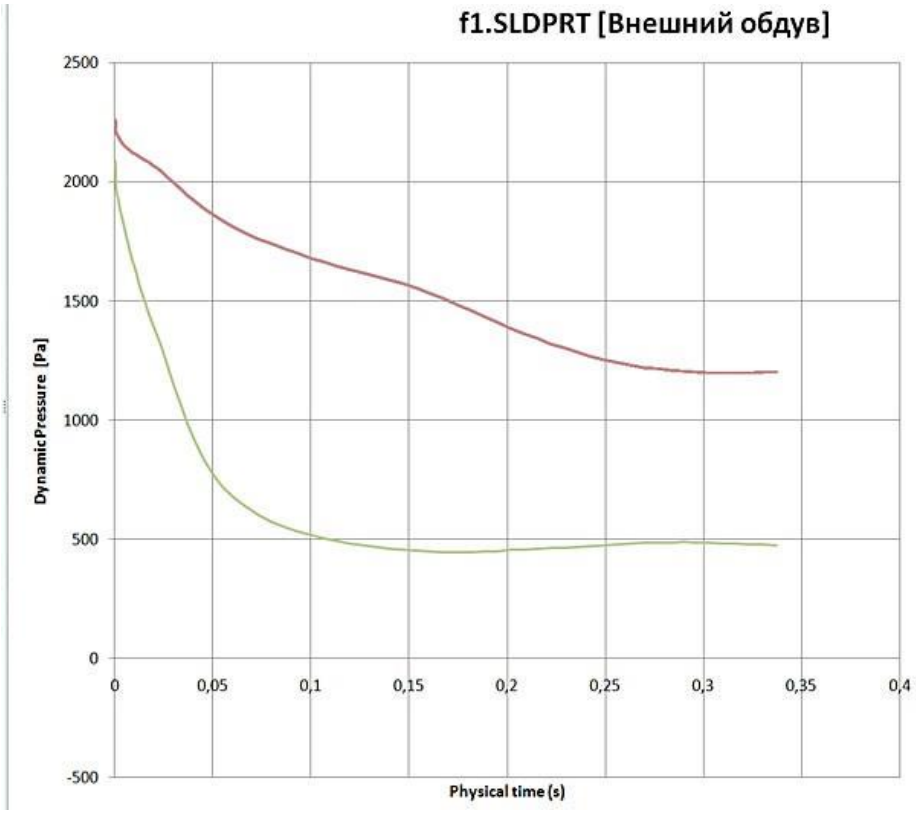


Рисунок 15 – Характер изменения динамической составляющей давления

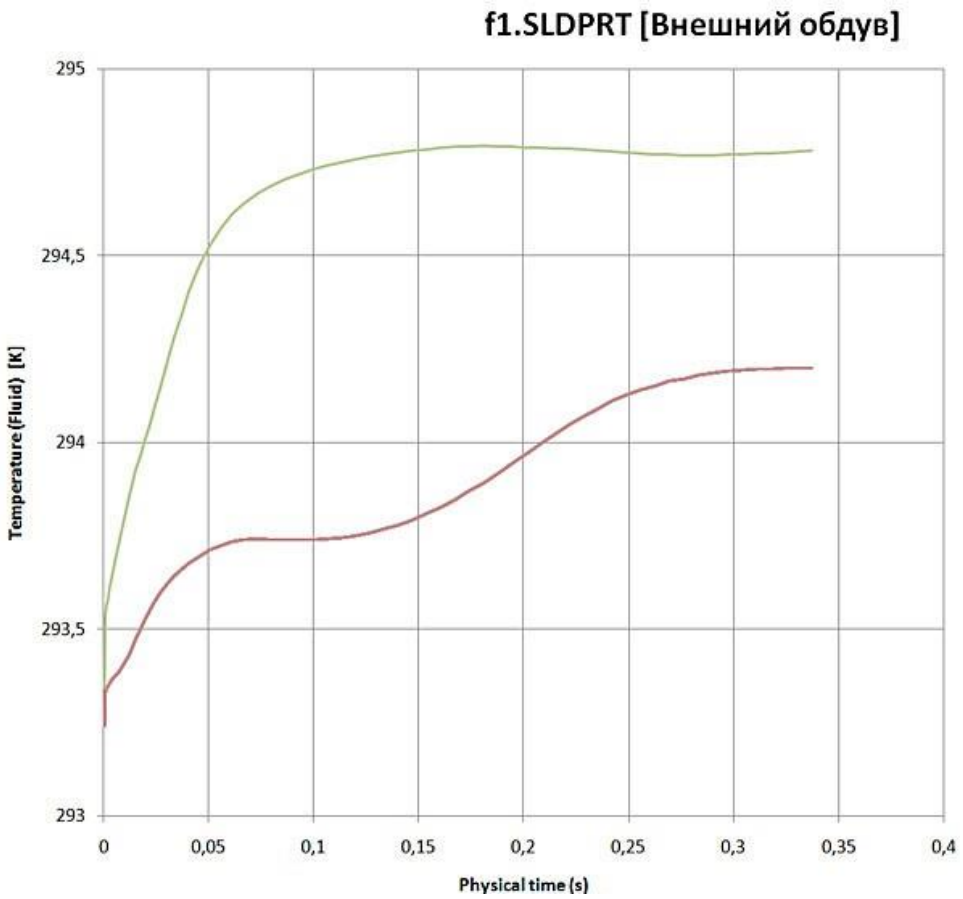


Рисунок 16 – Характер изменения температуры воздуха в контрольных точках

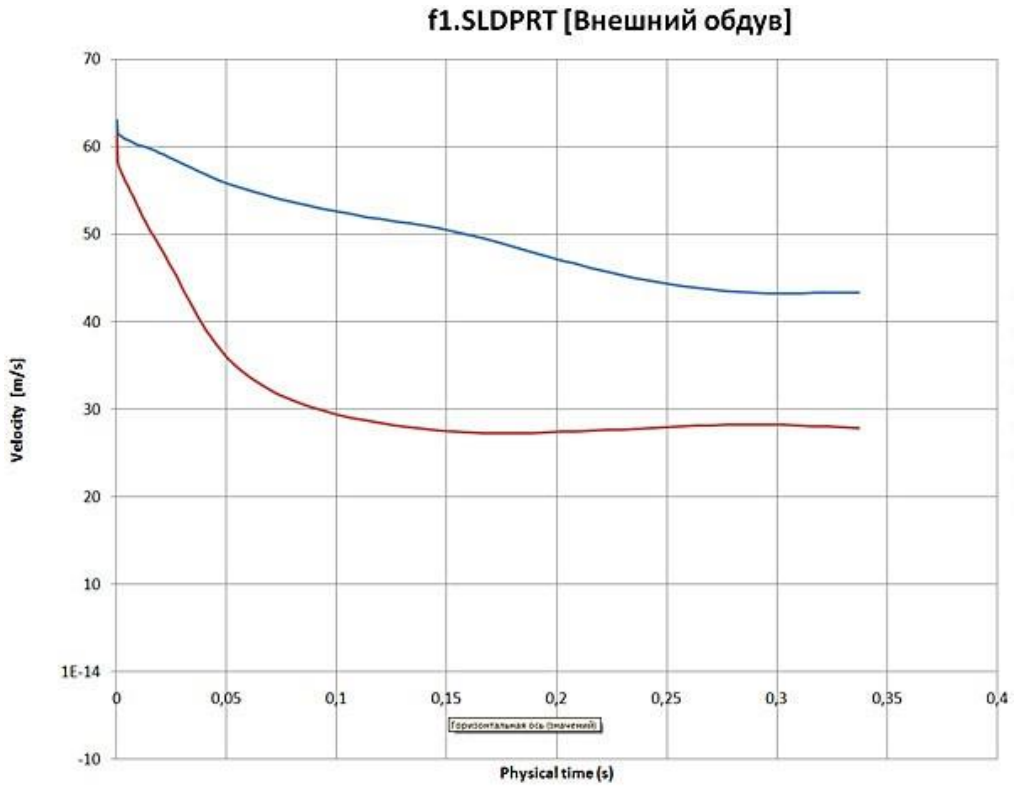


Рисунок 17 – Характер изменения скорости потока в контрольных точках

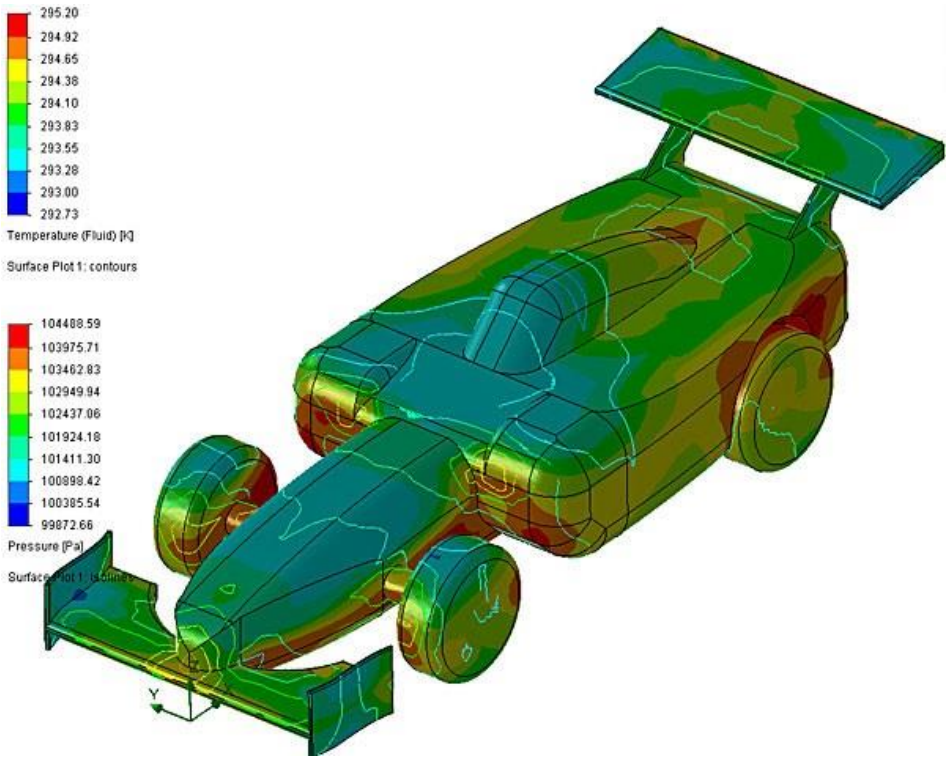


Рисунок 18 – Эпюры температуры и давления на поверхности автомобиля

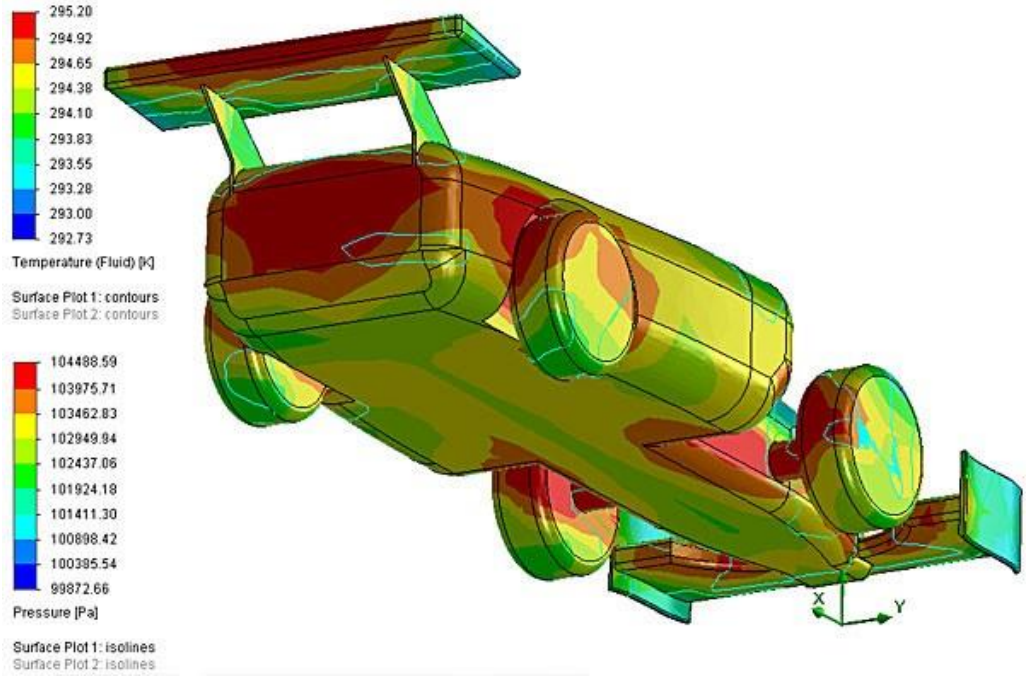


Рисунок 19 - Эпюры температуры и давления на поверхности автомобиля

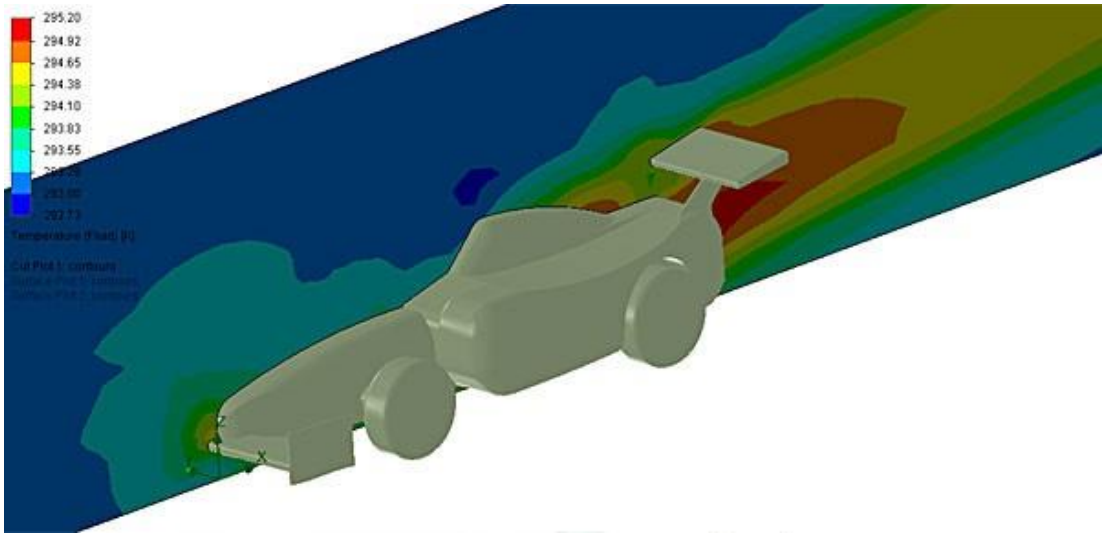


Рисунок 20 – Эпюра температуры в вертикальной плоскости симметрии

На рисунках 21…25 приведены эпюры скорости потока воздуха.

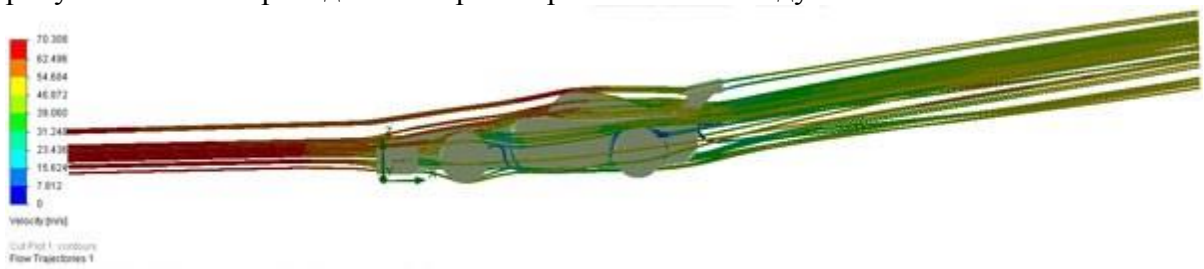


Рисунок 21 – Эпюра скорости потока, вид сбоку

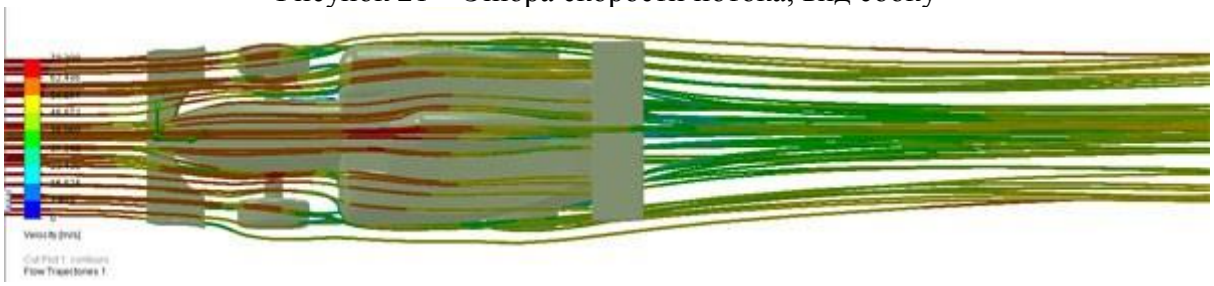


Рисунок 22 – Эпюра скорости потока, вид сверху

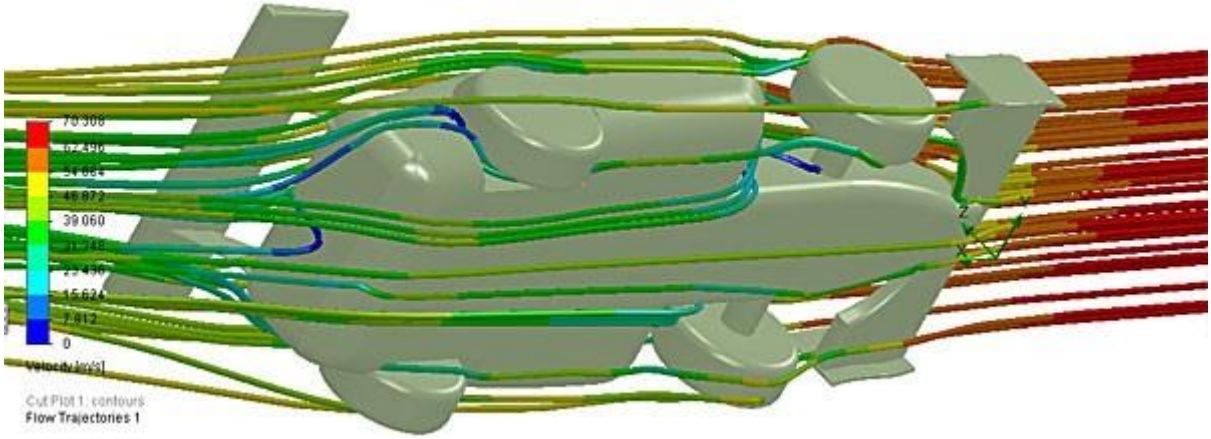


Рисунок 23 – Эпюра скорости потока, вид снизу

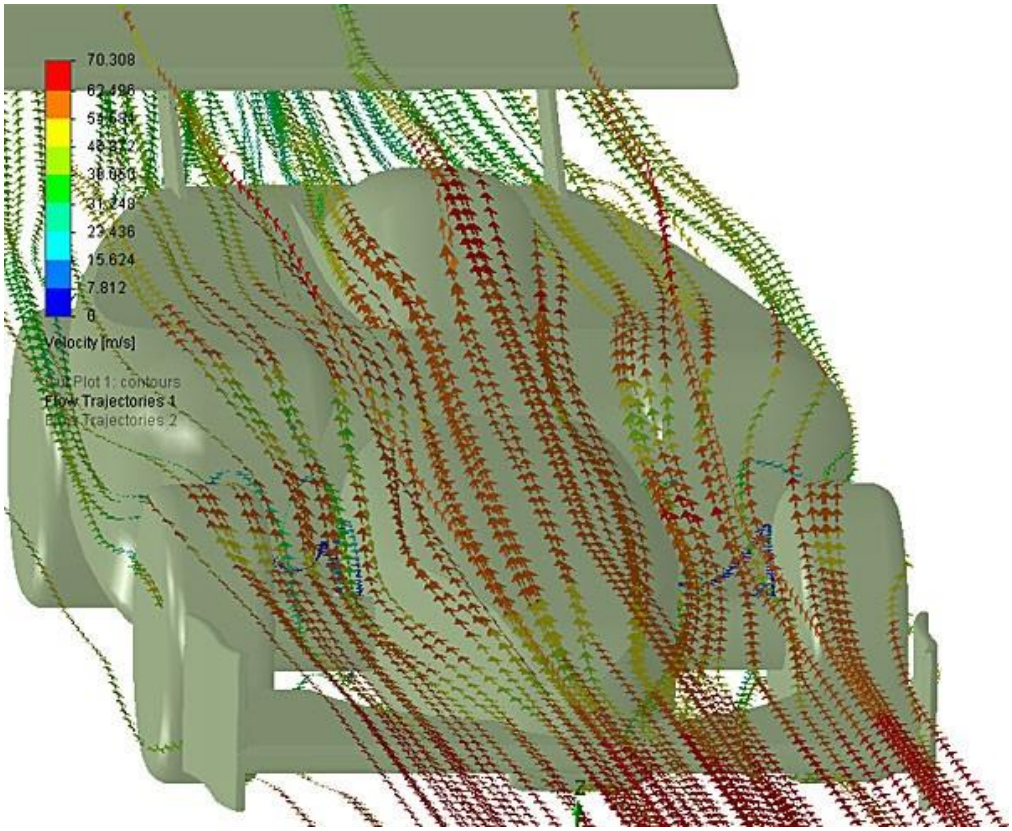


Рисунок 24 – Детализация эпюры скорости потока

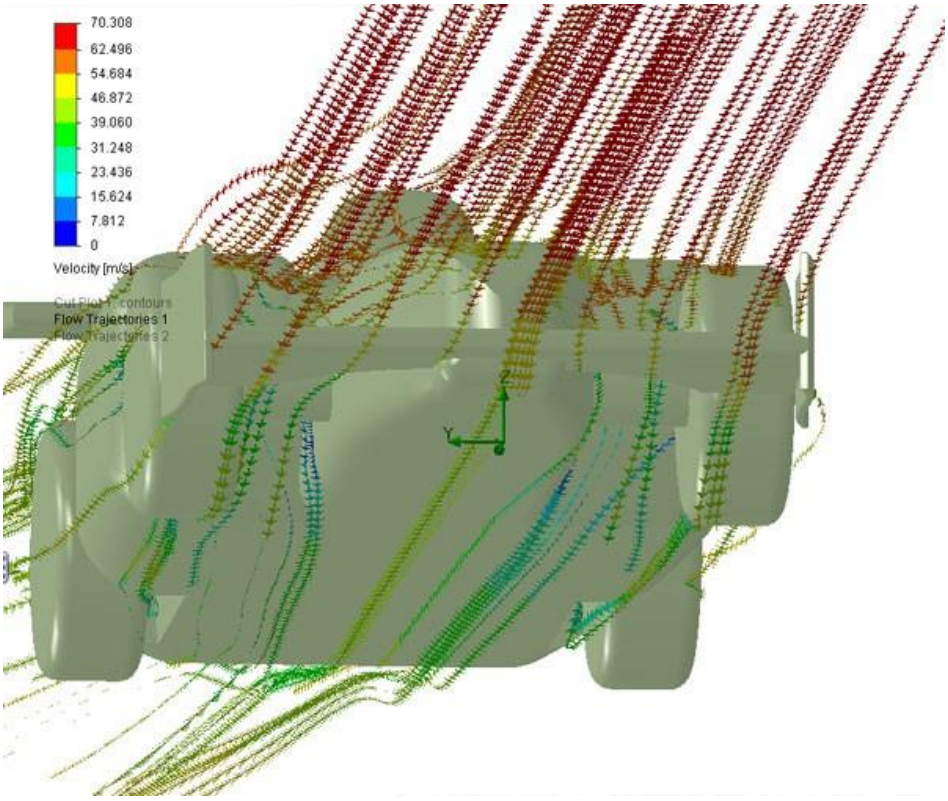


Рисунок 25 – Детализация эпюры скорости потока

Программа обеспечивает построение графиков изменения характеристик процесса для любого элемента конструкции. На рисунке 26 показано задание графика изменения температуры воздуха по длине кромки вертикального спойлера, а на рисунке 27 – представление

результатов в MS Excel. Зафиксированные промежуточные результаты можно обобщить и оформить как видеоролик. Приме такого видеоролика показан на рисунке 28.

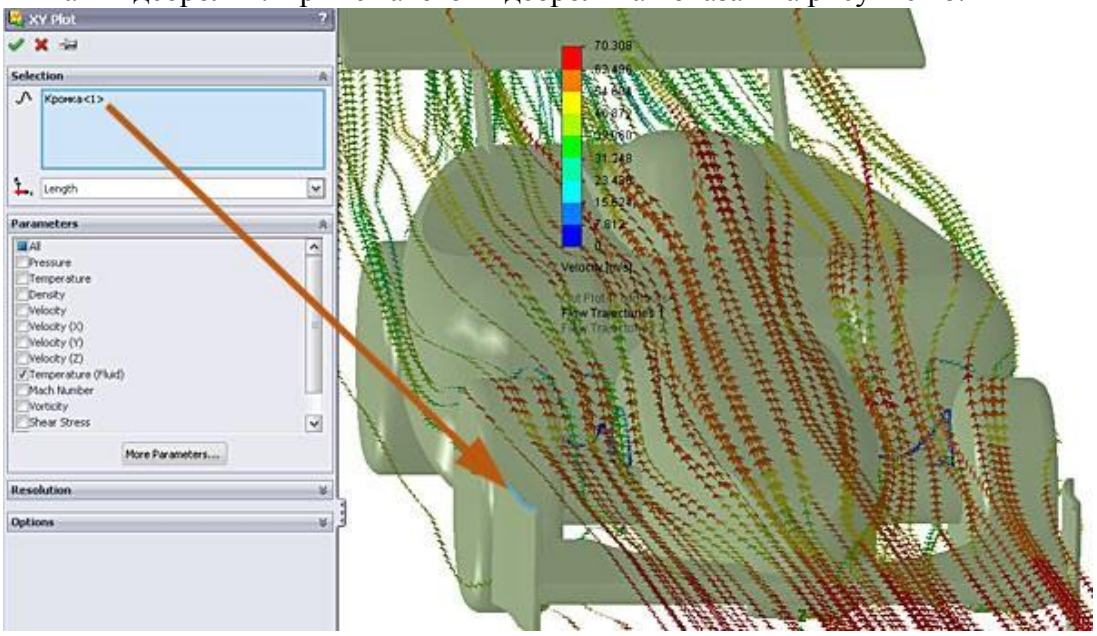


Рисунок 26 – Задание условий построения графика свойств потока

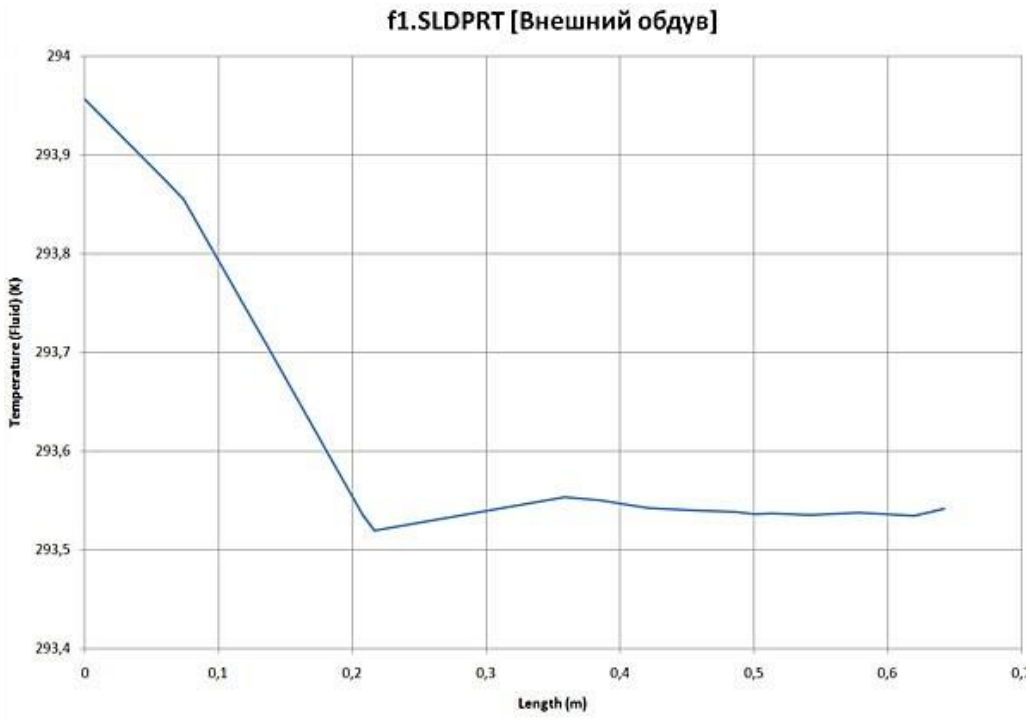


Рисунок 27 – Характер изменения температуры воздуха по длине кромки спойлера

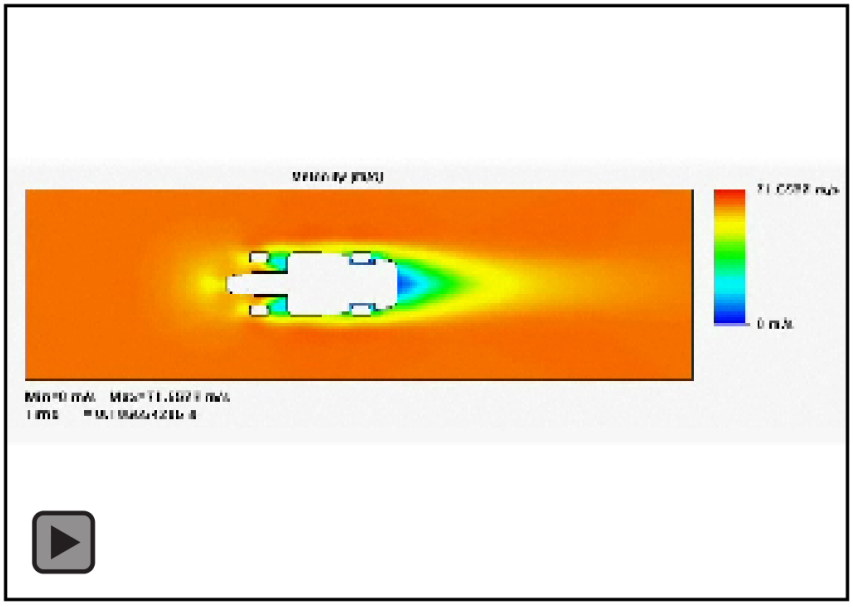


Рисунок 28 – Изменение скорости потока в горизонтальной плоскости. Видеоролик

Если в исследуемом изделии имеются каналы, походящие через его полость, то оба типа задач можно исследовать совместно (рисунки 29…32).

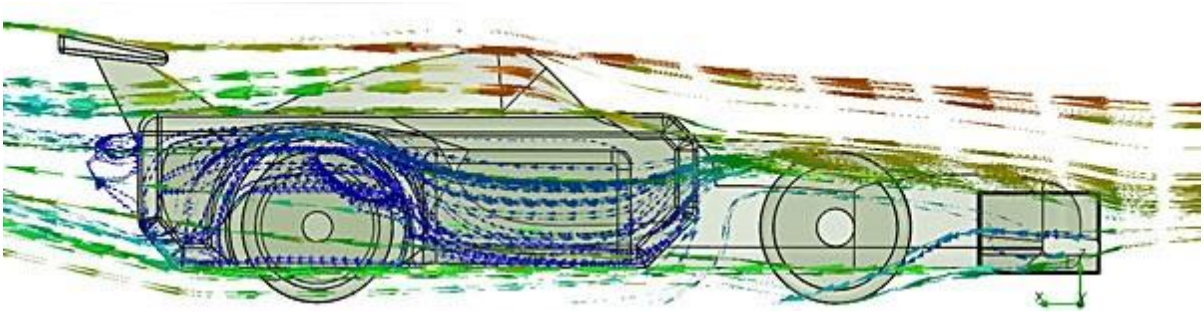


Рисунок 29 – Совместное решение задач анализа

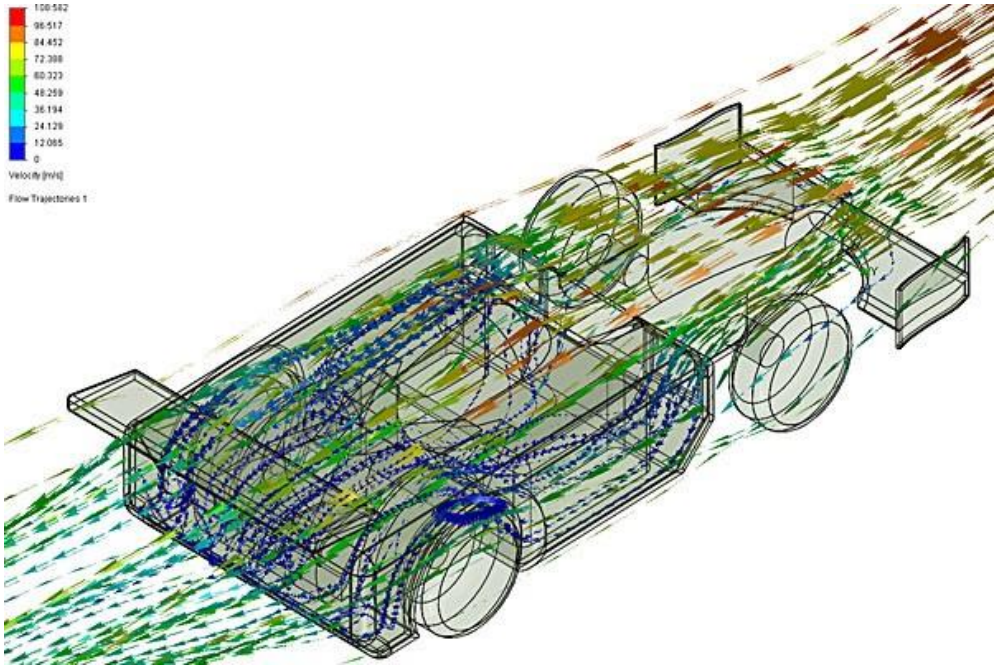


Рисунок 30 – Совместное решение задач анализа

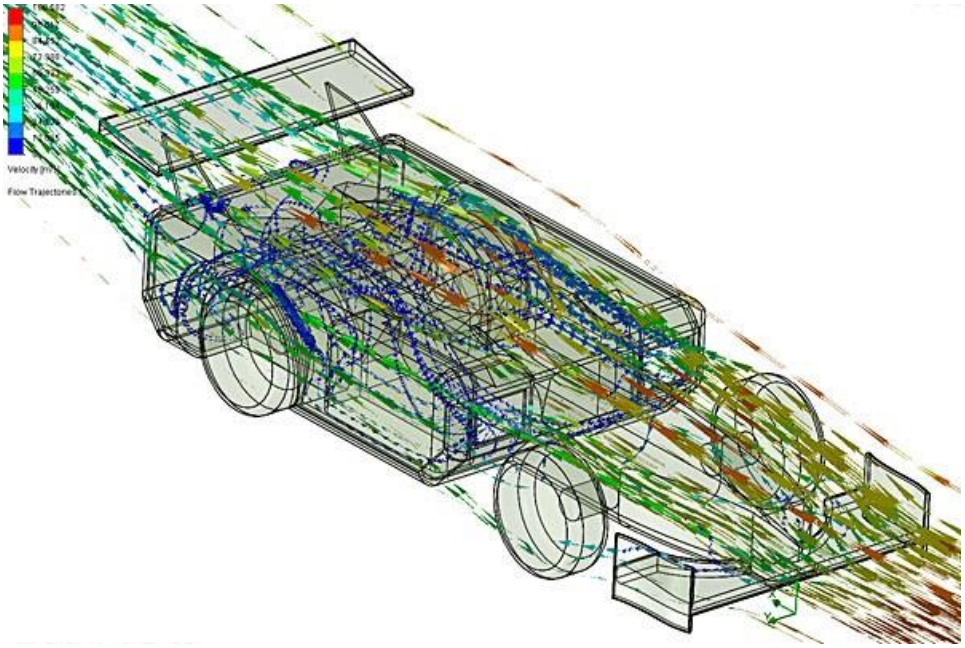


Рисунок 31 – Совместное решение задач анализа

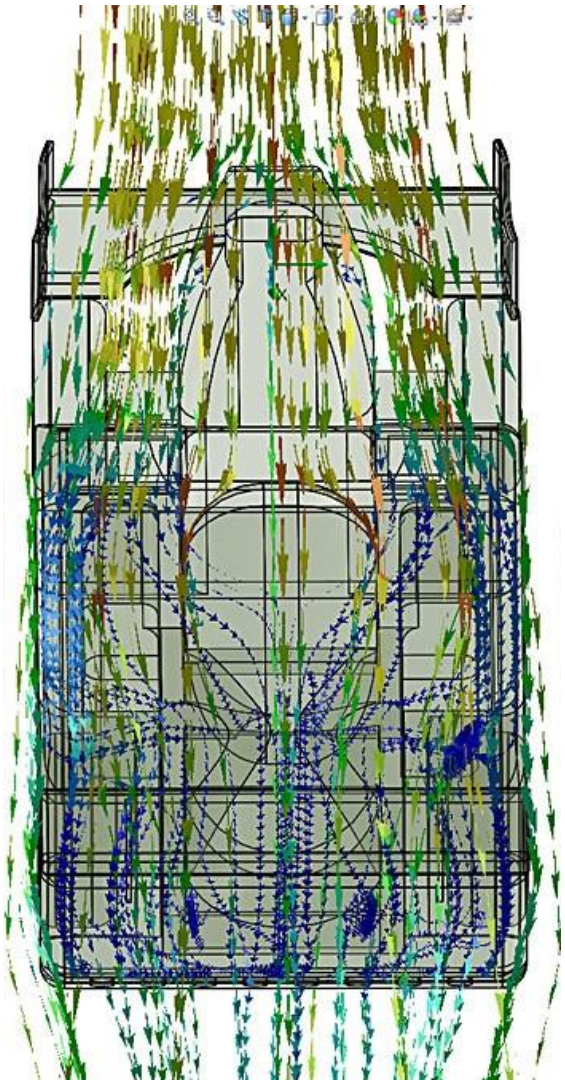


Рисунок 32 – Совместное решение задач анализа

Выводы:

1. Поставлена и решена задача моделирования внешнего течения для заданных условий исследования.
2. Получены промежуточные и конечные результаты исследования, описывающие изменение характеристик потока воздуха.

ЗАДАНИЕ

1. В условиях примера провести исследование характеристик воздушного потока при скорости движения автомобиля V = 320 км/ч и скорости бокового ветра (по оси Y) Vв = 25 м/с.
2. Составить отчет по результатам исследования.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение модуля SolidWorks Flow Simulation.
2. Возможности модулей SolidWorks Flow Simulation по исследованию внешних течений в процессе проектирования изделий автомобилестроения.
3. Необходимые условия для решения задач исследования с использованием модуля SolidWorks Flow Simulation.
4. Порядок формирования проекта.
5. Задание целей исследования.
6. Настройка области исследования.
7. Настройка визуализации результатов исследования.
8. Настройка регистрации промежуточных результатов.
9. Положительные моменты работы в модуле SolidWorks Flow Simulation.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алямовский, А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. - СПб.: БХВ-Петербург, 2008. - 1040 с.
2. Алямовский, А.А. SolidWorks / COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. - М.: ДМК Пресс, 2004. - 432 с.
3. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004. - СПб.: Питер, 2005. - 768 с.
4. Прохоренко В.П. SolidWorks. Практическое руководство. - М.: ООО "Бином-Пресс", 2004. - 448 с.
5. Справочная система SolidWorks.

Дьячков Юрий Алексеевич, **Торопцев** Иван Петрович, Генералова Александра Александровна

Моделирование систем в автомобиле- и тракторостроении

Учебное пособие издано в авторской редакции

Главный редактор – Кирсанов К.А.

Вёрстка – Кирсанов К.К.

Ответственный за выпуск – Алимова Н.К.

Учебное издание

Системные требования:
Системные требования: IBM PC с процессором Pentioum 2; ОЗУ 128 Мб; операц. система Windows XP; программа Adobe PDF Reader; CD-ROM дисковод, мышь.

Режим доступа: http://izd-mn.com/PDF/23MNNPU18.pdf, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.

ООО «Издательство «Мир науки»

«Publishing company «World of science», LLC

Адрес:

Юридический адрес — 127055, г. Москва, пер. Порядковый, д. 21, офис 401.

Почтовый адрес — 127055, г. Москва, пер. Порядковый, д. 21, офис 401.

http://izd-mn.com

ДАННОЕ ИЗДАНИЕ ПРЕДНАЗНАЧЕНО ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ НА ЭЛЕКТРОННЫХ НОСИТЕЛЯХ