

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(Самарский университет)

В.С. МЕЛЕНТЬЕВ, А.С. ГВОЗДЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВС ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РЕЖИМА РАБОТЫ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева" в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 13.03.03 Энергетическое машиностроение, 24.03.05, 24.04.05 Двигатели летательных аппаратов и специальности 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей

С А М А Р А
Издательство Самарского университета
2017

УДК 621.4(075)

ББК 39.55я7

М473

Рецензент д-р техн. наук, проф. В. Б. Балякин

Мелентьев, Владимир Сергеевич

М473 Исследование интегральных параметров ДВС при изменении режима работы: учеб. пособие / В. С. Мелентьев, А. С. Гвоздев. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 52 с.

ISBN 978-5-7883-1361-0

Данная работа не привязана к конкретному двигателю внутреннего сгорания, поскольку изложенный здесь метод расчёта и эксперимента применим для любого поршневого двигателя. В качестве примера взят двухтактный одноцилиндровый двигатель Д300. Приведены сведения, касающиеся конструкции и принципов работы двигателя Д300. Рассмотрена методика расчёта кинематики двигателя в программной среде MSC.ADAMS. Даны алгоритмы для определения перемещений, скоростей и ускорений в механизме, мощности и величины крутящего момента на выходном валу двигателя на стационарном и нестационарном режимах работы. Полученные результаты численного эксперимента сравнены со значениями, полученными в ходе натурального эксперимента.

Предназначено для Института двигателей и энергетических установок для обучения по направлениям подготовки 13.03.03 Энергетическое машиностроение, 24.03.05, 24.04.05 Двигатели летательных аппаратов и специальности 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей по дисциплинам «Динамика двигателей», «Интегрированные информационные технологии» («Integrated information technologies»), «Кинематика ДВС», «Основы автоматического проектирования авиационных двигателей».

Разработано на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

УДК 621.4(075)

ББК 39.55я7

ISBN 978-5-7883-1361-0

© Самарский университет, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Занятие 1. Знакомство с 3D-моделью ДВС и проведение эксперимента.	6
Занятие 2. Создание кинематических групп ДВС.....	14
Занятие 3. Приложение кинематических граничных условий.....	20
Занятие 4. Проведение расчёта и анализ результатов.....	29
ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....	45
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	46
ПРИЛОЖЕНИЕ. Описание и характеристики двигателя Д300.....	47

РЕФЕРАТ

Методические указания: 51 стр., 39 рис., 8 табл., 7 источ., 1 прил.

БЕСТОРМОЗНОЙ МЕТОД, ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, ДИНАМИКА, КИНЕМАТИКА, КОНСТРУКЦИЯ, НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ, ПОРШНЕВОЙ ДВИГАТЕЛЬ, ТОРМОЗНОЙ МЕТОД, ЭКСПЕРИМЕНТ, ANSYS, MSC.ADAMS, SIEMENS NX

Данная работа не привязана к конкретному двигателю внутреннего сгорания, поскольку изложенный здесь метод расчёта и эксперимента применим для любого поршневого двигателя. В качестве примера взят двухтактный одноцилиндровый двигатель Д300. Приведены сведения, касающиеся конструкции и принципов работы двигателя Д300. Рассмотрена методика расчёта кинематики двигателя в программной среде MSC.ADAMS. Даны алгоритмы для определения перемещений, скоростей и ускорений в механизме, мощности и величины крутящего момента на выходном валу двигателя на стационарном и нестационарном режимах работы. Полученные результаты численного эксперимента сравнены со значениями, полученными в ходе натурного эксперимента.

ВВЕДЕНИЕ

Доводка поршневых или двигателей внутреннего сгорания (ДВС) весьма сложна и трудоемка. Требуются большие объемы опытно-конструкторских работ, связанные с настройкой и изменением конструкции. И с использованием только экспериментальных методов все это является чрезвычайно длительной и дорогостоящей процедурой. Сокращению сроков разработки новых двигателей способствует наличие достоверной и полной информации о сложных, происходящих в них нестационарных процессах. Сейчас общепризнанным и наиболее перспективным путем сокращения затрат в этом случае является использование вычислительных технологий и ЭВМ. При этом сам вычислительный процесс при обеспечении должного уровня достоверности может рассматриваться как численный эксперимент.



Рис. 1. Алгоритм автоматизированного проектирования

С начала XXI века в комплексном применении систем автоматизированного проектирования окончательно утвердился алгоритм моделирования, показанный на рис. 1, где результаты выполнения всех предыдущих блоков являются исходными данными следующего блока. Его особенностью являются:

Разбиение жизненного цикла изделия на отдельные этапы, для каждого из которых используется своя модель и свои методы расчёта и анализа;

Тесная интеграция отдельных моделей и обмен результатами в рамках единых интерфейсов (глубокая интеграция), нейтральных форматов и PDM-систем.

Получающаяся в итоге совокупность моделей и результатов расчёта и анализа, охватывающая важные свойства и аспекты поведения изделия называется "виртуальным изделием".

Современные стандарты в области информационной поддержки жизненного цикла изделий (ИПИ (CALS)-технологий) определяют, что 3D-модель является основным информационным объектом при проектировании и подготовке производства. В настоящее время только цифровая 3D-модель может быть передана из систем автоматизированного проектирования (САПР) в системы с числовым программным управлением (ЧПУ). Это позволяет объединить технологии автоматизированного проектирования, инженерного

анализа и подготовки программ для станков с ЧПУ в интегрированную информационную среду.

Для каждого этапа моделирования применяется конкретное программное обеспечение (ПО) или инструмент, позволяющий создавать модель и анализировать один из аспектов изделия. Каждому блоку может соответствовать несколько ПО, и наоборот, одно ПО может охватывать своими возможностями несколько блоков.

В данной работе рассматривается часть алгоритма от задания исходных данных до выхода на прочностной анализ. Работа не привязана к конкретному двигателю внутреннего сгорания, поскольку изложенный здесь метод расчёта и эксперимента применим для любого поршневого двигателя. В качестве предмета исследования выбран двигатель Д300.

Целью работы является изучение конструкции и функционирования поршневого двигателя Д300, ознакомление с методикой расчёта кинематики двигателя внутреннего сгорания на основе выполнения его расчёта в среде ПО MSC.ADAMS; определение перемещений, скоростей, ускорений в механизме, оценка интегральных параметров - величины мощности и крутящего момента на выходном валу двигателя в условиях стационарного и нестационарного режимов работы; сравнение вычисленных значений с результатами, полученными в ходе натурного эксперимента.

ЗАНЯТИЕ 1. ЗНАКОМСТВО С 3D-МОДЕЛЬЮ ДВС И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для реализации первого звена в цепочке:



были использованы программы 2D- и 3D-моделирования «SolidWorks» и «КОМПАС».

При 3D-моделировании важно заранее продумать схему построения модели, поскольку к конечному результату могут вести несколько цепочек и мастерство – выбрать самую простую. Некоторые цепочки могут содержать невыполнимые операции, и модель придётся бросать, когда она почти готова.

С целью получения детальной информации об особенностях конструкции и геометрических размерах объекта исследования, двигатель был подвергнут разборке, очистке и последующей сборке. Кроме этого, было произведено взвешивание основных элементов кривошипно-шатунного механизма для получения инерционных и других характеристик двигателя. Все размеры в модели снимались непосредственно с двигателя и уточнялись по руководству по эксплуатации двигателя, некоторые выдержки из которого приведены в приложении.

Так как для создания динамической модели не требуется очень высокая точность геометрии, необходимо лишь обеспечить точные массово-

инерционные характеристики, то при построении модели был принят ряд допущений:

1. Все болтовые элементы выполнялись гладкими, причем диаметр бобышек принимался по внешнему диаметру резьбы, а отверстий – по внутреннему. Добавление резьбы резко замедляет процесс расчета и требует значительный объем графической памяти, и с динамической точки зрения бесполезно, так как легко заменяется идеализированным винтовым шарниром.

2. Сложные аэродинамические поверхности, такие как перепускные и выпускные каналы, улитка вентилятора и т. п. были существенно упрощены, поскольку не оказывают влияние на процесс динамического расчета.

3. Вспомогательные агрегаты двигателя (магнето, датчик оборотов, карбюратор и т.д.), были заменены корпусами эквивалентной массы и момента инерции.

4. Цвета большинства деталей подбирались в соответствии с классификацией, по их типу или функциональному назначению.

5. Сложные литейные формы были упрощены.

6. Все сопрягаемые поверхности соединялись без зазоров и отклонений.

7. Некоторые элементы небольших размеров и массы, для упрощения структуры модели, были выполнены заодно. Например, некоторые шайбы и прокладки. В случаях, когда объединялись детали соизмеримых масс, определялась средняя плотность объекта.

8. Профиль зубьев в зубчатых соединениях был упрощен.

При создании модели была использована многоуровневая иерархическая структура, представленная на рисунке 2.

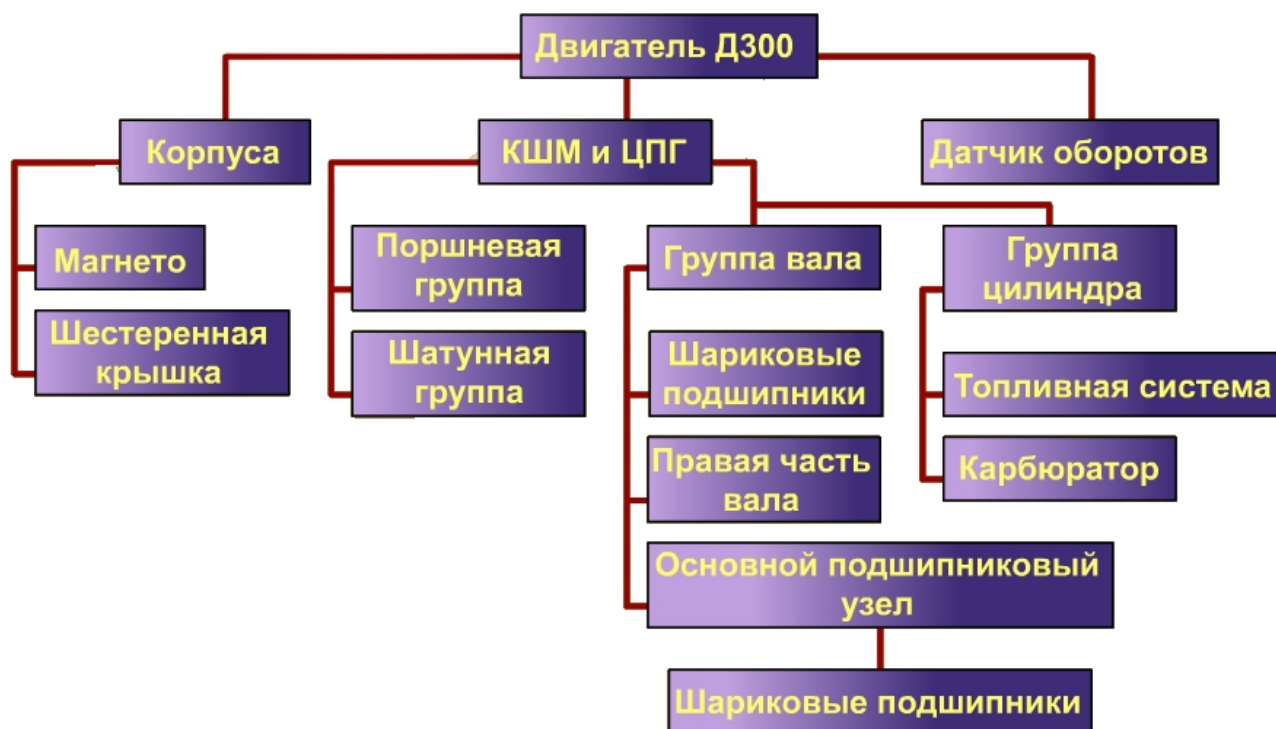


Рис. 2. Иерархическая структура 3D-модели

На самом нижнем уровне (рис. 2) находятся простейшие сборочные единицы, такие как подшипники и отдельные детали двигателя, подобные корпусным (рис. 3).

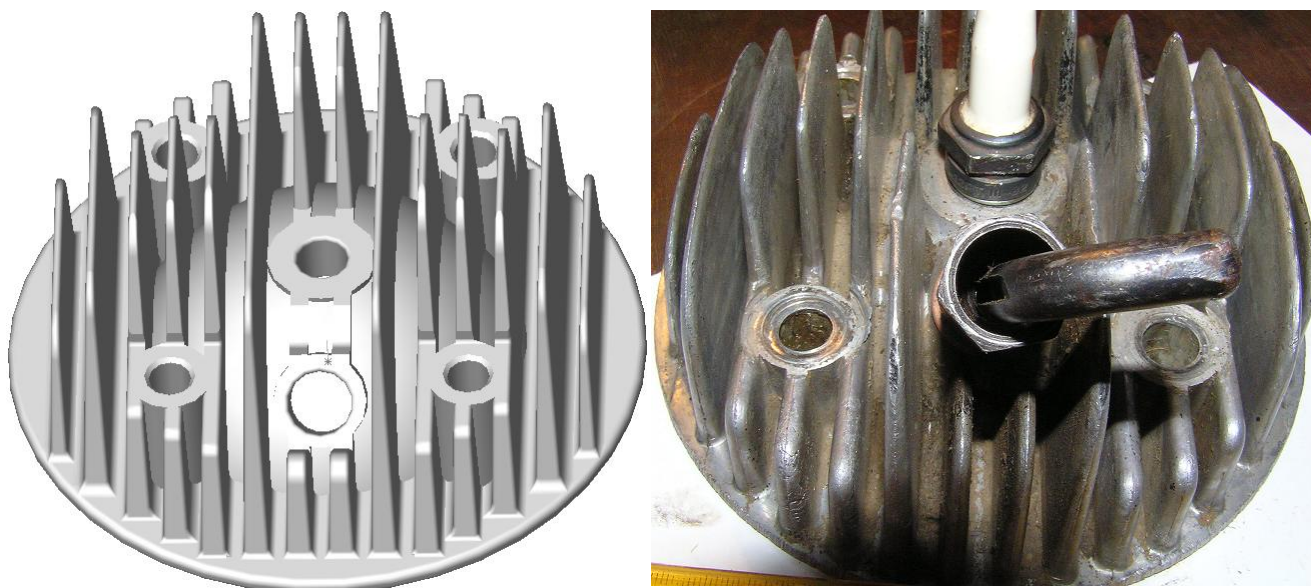


Рис. 3. 3D-модель (слева) головки цилиндра (справа) двигателя

Простейшие сборки включаются в более сложные, те – в еще более сложные и т. д. Данная схема, называемая модульной, имеет ряд преимуществ:

1. Каждый отдельный модуль может проектировать отдельный человек, что существенно ускоряет работу.

2. Небольшие сборки можно выполнять на компьютерах с незначительным объемом оперативной и графической памяти, а итоговую – на более мощной ЭВМ.

3. В случае необходимости, в отдельные модули легко внести изменения без нарушений структуры всей модели.

4. Структура модели строго упорядочивается, что обуславливает быстрый поиск, легкий и полный доступ к каждой отдельной детали.

На рис. 4 представлена модель с четверть вырезом, на которой хорошо видно внутреннее устройство данного двигателя.

В законченном варианте 3D-модель имеет следующий состав (табл. 1):

Табл. 1. Статистика 3D-модели двигателя

№	Группа	Элементов	Примечания
1	Группа вала	25/25	2 сборки
2	Шатунная группа	2/2	1 сборка
3	Поршневая группа	5/6	1 сборка
4	Прокладки	7/8	
5	Крепежный элемент	23/88	
6	Подшипники	19/82	4 сборки
7	Корпусные детали	22/47	2 сборки
8	Вспомогательные агрегаты	52/68	6 сборок + Д300
	ВСЕГО В МОДЕЛИ	155/326	16 сборок + Д300

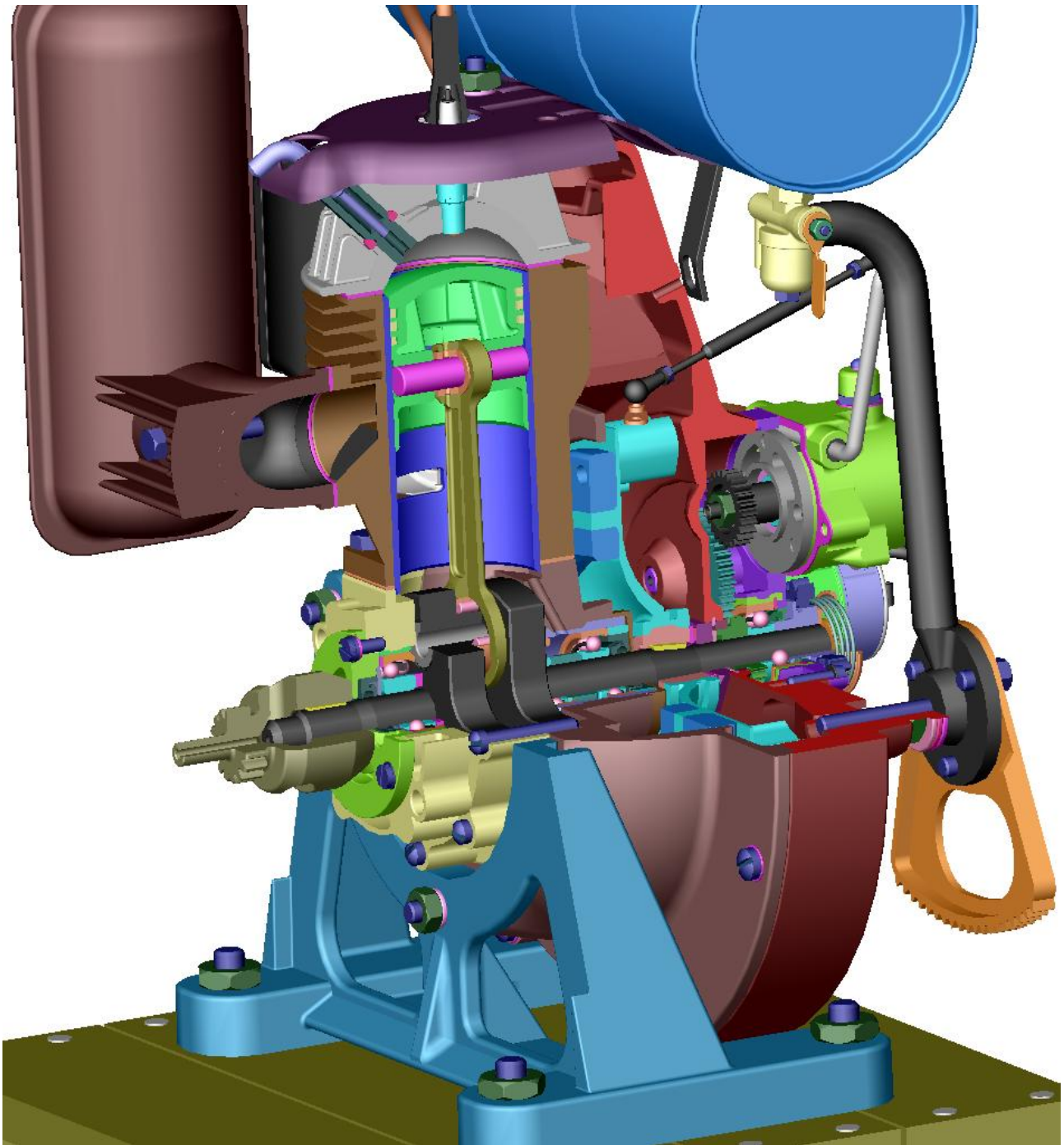


Рис. 4. Итоговая сборка «Двигатель Д300»

Модель двигателя в комплектации, показанной на рис. 4, имеет массу 33,085 кг, что соответствует массе 33 кг, указанной в паспортных данных.

В качестве исходных данных (табл. 2) для проведения работы требуется проведение газодинамического расчёта на установившемся режиме. Среднее давление на поршень в цилиндре в зависимости от угла поворота коленчатого вала φ , который на установившемся режиме связан с перемещением поршня S выражением

$$S = R \cdot \left((1 - \cos\varphi) + \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos 2\varphi) \right),$$

где R - радиус кривошипа (половина полного хода поршня S_H),

$$\lambda = \frac{R}{L},$$

где L - длина шатуна, представляется в виде индикаторной диаграммы свёрнутой (рис. 5б) и развёрнутой (рис. 5а), которая будет использоваться для кинематических и динамических расчётов. Расчёт должен быть произведён на нескольких режимах, как минимум холостого хода, максимальной мощности и максимальных оборотов с несколькими промежуточными значениями частоты вращения двигателя n .

Нулевое положение вала соответствует верхней мёртвой точке (ВМТ), что для двухтактного двигателя всегда означает процесс горения. Кроме того, диаграмма повторяется каждые 360 градусов. Поскольку для твердых тел в пакете MSC.ADAMS приложение давления не имеет смысла, давление газов было приведено к сосредоточенной газовой силе F_T [Н] путем умножения на площадь сечения поршня A_{Π} [м²].

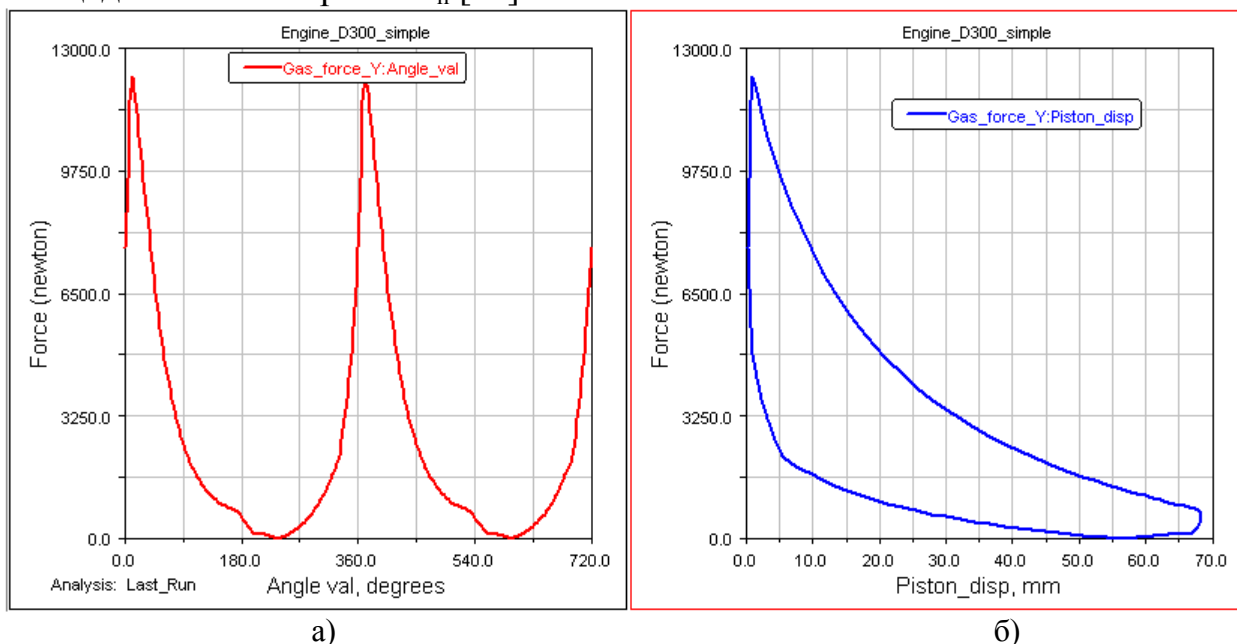


Рис. 5. Индикаторная диаграмма: а) от угла поворота коленчатого вала; б) от хода поршня. Angle val, degrees - угол поворота коленчатого вала α [градусы]; Force (newton) - газовая сила F_T [Н]; Piston_disp, mm - ход поршня S [мм]

Табл. 2. Исходные данные для теплового расчёта двигателя Д300

Частота вращения коленчатого вала	n	3000	об/мин
Коэффициент избытка воздуха	α	0,85	-
Диаметр цилиндра	$D_{ц}$	74	мм
Ход поршня	S	68	мм
Высота выпускных окон от НМТ	$h_{в}$	21,5	мм
Степень сжатия	ε	6,2	-
Число цилиндров	i	1	-
Давление внешней среды	P_H	0,1013	МПа
Температура внешней среды	T_H	293	К
Элементарный химический состав топлива			
Доля углерода	C	0,85	-
Доля водорода	H	0,15	-

Геометрические размеры и расположение выхлопных и продувочных окон приняты согласно чертежу цилиндра двигателя Д300.

Определим основные геометрические параметры.

Объем цилиндра, соответствующий полному ходу поршня:

$$V_s = \frac{\pi \cdot D_u^2}{4} \cdot S = \frac{3,14 \cdot 0,074^2}{4} \cdot 0,068 = 0,000293, \quad \text{м}^3 = 293, \quad \text{см}^3.$$

Действительный ход поршня:

$$S_0 = S - h_g = 0,068 - 0,0215 = 0,0465, \quad \text{м} = 46,5, \quad \text{мм}.$$

Объем камеры сгорания:

$$V_c = \frac{V_H}{\varepsilon - 1} = \frac{0,000293}{6,2 - 1} = 0,0000563, \quad \text{м}^3 = 56,3, \quad \text{см}^3.$$

Объем цилиндра, соответствующий действительному ходу поршня:

$$V_{s_0} = \frac{\pi \cdot D_u^2}{4} \cdot S_0 = \frac{3,14 \cdot 0,074^2}{4} \cdot 0,0465 = 0,000200, \quad \text{м}^3 = 200, \quad \text{см}^3.$$

Действительная степень сжатия:

$$\varepsilon_0 = \frac{V_{s_0} + V_c}{V_c} = \frac{0,000200 + 0,0000563}{0,0000563} = 4,55.$$

Геометрический полный объем цилиндра:

$$V_a = V_s + V_c = 0,000293 + 0,0000563 = 0,0003493, \quad \text{м}^3 = 349,3, \quad \text{см}^3.$$

Действительный полный объем цилиндра:

$$V_{a_0} = V_{s_0} + V_c = 0,000200 + 0,0000563 = 0,0002563, \quad \text{м}^3 = 256,3, \quad \text{см}^3.$$

В данном двигателе имеется кривошипная камера, в которой рабочая смесь сжимается до поступления в цилиндр. Поэтому необходимо определить изменение параметров смеси при прохождении кривошипной камеры.

Степень сжатия в кривошипной камере:

$$\varepsilon_{\text{кк}} = \frac{V_{\text{кк max}}}{V_{\text{кк max}} - V_s} = \frac{0,0007193}{0,0007193 - 0,000293} = 1,69.$$

Максимальный объем кривошипной камеры $V_{\text{кк max}}$ определен путём измерений на 3D-модели при положении поршня в ВМТ.

Исходное давление в кривошипной камере:

$$P_{\text{кк}} = P_H \cdot \sigma_{\text{вх}} = 0,1013 \cdot 0,68 = 0,06888, \quad \text{МПа}.$$

где $\sigma_{\text{вх}} = 0,68$ – коэффициент потерь во входном устройстве – выбран исходя из конструкции фильтрующего элемента.

Максимальное давление в кривошипной камере в конце процесса сжатия:

$$P_{\text{кк max}} = P_{\text{кк}} \cdot \varepsilon_{\text{кк}}^{n_{\text{кк}}} = 0,06888 \cdot 1,69^{1,2} = 0,1293, \quad \text{МПа}.$$

где $n_{\text{кк}} = 1,2$ - показатель политропы в кривошипной камере.

Максимальная температура в кривошипной камере в конце процесса сжатия:

$$T_{\text{кк max}} = T_H \cdot \varepsilon_{\text{кк}}^{n_{\text{кк}} - 1} = 293 \cdot 1,69^{1,2 - 1} = 325,4, \quad \text{К}.$$

Исходные данные для кинематического и динамического расчета сведены в таблицу 3.

Табл. 3. Исходные данные для динамического расчёта

Радиус кривошипа	R	34	мм
Длина шатуна	L	133	мм
Виртуальный ход поршня	Sc	13,1	мм
Угловая скорость	ω	314,16	1/с
Масса поступательных частей	m_n	0,53	кг
Масса шатуна	$m_{ш}$	0,288	кг
Масса поршневой группы	$m_{пг}$	0,458	кг
Поступательная масса шатуна	$m_{ш.п.}$	0,072	кг
Вращающаяся масса шатуна	$m_{ш.к.}$	0,216	кг
Неуравновешенная масса КВ	m_k	0,385	кг
Расстояние до левой коренной шейки	l_1	0,01	мм
Расстояние до правой коренной шейки	l_2	0,015	мм
Расстояние между коренными шейками	L_k	0,025	мм
Период одного оборота	T	0,02	с

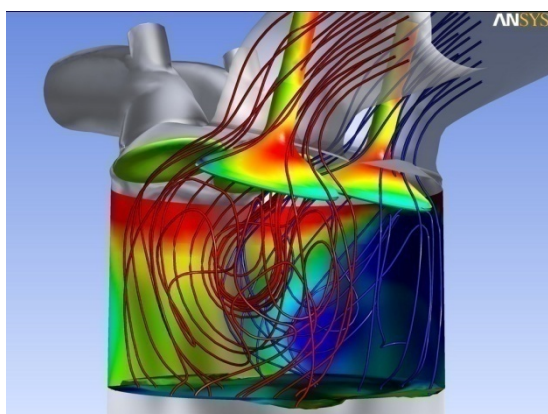


Рис. 6. Линии тока в цилиндре ДВС

В дальнейшем требуется определение среднего по площади давления на поршень в нестационарной постановке, т.е. $P_{cp} = f(\alpha, t)$ или $P_{cp} = f(S, t)$. Давление газов приводится к сосредоточенной газовой силе F_r [Н] путем умножения на площадь сечения поршня A_p [м²].

Данный расчёт может быть выполнен с использованием, например, конечно-элементных пакетов газовой динамики ANSYS CFX или ANSYS Fluent (рис. 6).

Учёт нестационарности ($t = var$) позволяет выполнить расчёт переходных процессов между вычисленными ранее режимами, что даёт возможность уточнить расчёт разгона двигателя.

Помимо расчётных значений и паспортных характеристик двигателя Д300, в работе может быть использована экспериментальная проверка полученных в результате численного эксперимента основных параметров. Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 7.

Управление двигателем и обработку данных осуществляет контролер. Двигатель связан с тормозным устройством, которое снимает с вала двигателя крутящий момент. Конструкция тормозного устройства может быть как простейшей - рассеивание энергии в тепло трения, так и более сложной, например, винт (воздушный или жидкостной), электрогенератор и т.п. В процессе проведения эксперимента к двигателю необходимо обеспечить подвод топлива (для двухтактного двигателя Д300 - топлива, смешанного с маслом в определённой пропорции). Прочие системы двигателя (система зажигания, смазки, охлаждения, наддува, опоры) монтируются на самом двигателе или на раме. Экспериментальный стенд оснащён датчиками, которые фиксируют с определённой дискретизацией (частотой опроса в секунду или же количество

точек в секунду) заданные исследователем параметры: частоту вращения коленчатого вала двигателя, крутящий момент на выходном валу и др.



Рис. 7. Схема экспериментальной установки

Суть эксперимента состоит в следующем.

Двигатель выводится на ряд стационарных режимов с регулировкой по частоте вращения n [об/мин]. Затем по показаниям датчиков фиксируются доступные параметры: прежде всего, крутящий момент M_n [Н·м]. Полученные данные заносятся в соответствующую таблицу протокола эксперимента. По указанию преподавателя в протокол могут быть занесены и другие данные, согласно вариантам лабораторной работы. В зависимости от модели и технических характеристик, указанных в паспорте на стендовое оборудование, контроллера, установленного на экспериментальный стенд, может быть экспериментально получен график зависимости $M_n = f(n)$ на переходных режимах.

Полученные данные фиксируются в протоколе эксперимента в виде таблиц (табл. 4), где первым столбцом идёт независимый параметр, например, частота вращения n или угол поворота φ коленчатого вала, а вторым столбцом - значение измеряемой функции (крутящего момента, давления внутри цилиндра, виброперемещения деталей относительно опор). По решению преподавателя полученные значения могут быть оформлены в протоколе эксперимента в виде соответствующих графиков. В конце экспериментального исследования необходимо оценить погрешность вычислений заданных параметров двигателя.

Табл. 4. Сравнение экспериментальных и расчётных параметров

№	n , об/мин	M_n э, Н·м	M_n р, Н·м	ε , %
1	$n_{x.x.}$			
2				
...				
m	n_{max}			

В табл. 4 $M_n \text{ э}$ - экспериментальное значение крутящего момента, $M_n \text{ р}$ - расчётное значение крутящего момента, $n_{\text{х.х.}}$ - частота холостого хода двигателя, n_{max} - максимальная частота вращения коленчатого вала, ε - величина расхождения между расчётным и экспериментальным значением, определяемое из выражения

$$\varepsilon = \frac{|M_n \text{ э} - M_n \text{ р}|}{M_n \text{ э}} \cdot 100\%.$$

ЗАНЯТИЕ 2. СОЗДАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ГРУПП ДВС

Расчёт динамики двигателя Д300 производится в пакете MSC.ADAMS, который предоставляет пользователю следующие возможности:

1. Создавать компьютерную модель системы из жёстких и деформируемых элементов, соединённых между собой различными связями и шарнирами;
2. Одновременно создавать параметризованную модель двигателя.
3. Визуализировать модель конструкции мощными средствами трёхмерной графики.
4. Задавать вынужденные перемещения и движения элементов системы и прикладывать активные внешние силы и моменты.
5. Проводить статический, динамический и кинематический анализы системы.
6. Визуализировать движение системы и фиксировать заданные события.
7. Анализировать влияние вариаций конструктивных элементов на поведение системы в целом.
8. Оптимизировать изделие по заданному критерию.
9. Получать результаты анализа в виде графиков, таблиц, анимации работы.
10. Производить двусторонний обмен информацией с программными комплексами автоматизированного проектирования, конечно-элементного анализа, анимации.
11. Использовать специализированные модули, ориентированные на конкретные области техники.

В основе пакета лежит следующая математическая модель. Основой для системы уравнений, описывающих динамику системы n твёрдых тел, находящихся под действием m_a заданных сил F и стесненных m голономными связями Φ , послужили уравнения в форме Эйлера-Лагранжа с множителями:

$$\dot{p}_i = \frac{\partial L}{\partial q_i} + \sum_{k=1}^{m_a} \bar{F}_i \cdot \frac{\partial \bar{r}_k}{\partial q_i} - \sum_{j=1}^m \lambda_j \frac{\partial \Phi_j}{\partial q_i},$$

$$p_i - \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = 0,$$

$$u_i - \dot{q}_i = 0, i = 1, \dots, 6n,$$

$$\Phi_j(\{q_\alpha\}, t) = 0, j = 1, m,$$

$$\bar{F}_k - \bar{f}_k(\{q_\alpha\}, \{u_\beta\}, \{\lambda_\gamma\}, t) = 0, k = \overline{1, m_a}.$$

Для задания движения твердого тела используются инерциальные глобальные координаты его центра масс q и углы Эйлера. По умолчанию ориентация определяется последовательными поворотами вокруг главных центральных осей тела 3-1-3 (для них в интерфейсе и документации пакета используется обозначение *B313*) на углы ψ – прецессии, θ – нутации, φ – собственного вращения. Выбор одной из 24 систем углов Эйлера должен быть сделан в процессе сборки модели, перед началом симуляции.

Физический смысл этого уравнения следующий – в каждый момент времени сила реакции в закреплениях тел (шарнирах), должна быть уравновешена внешними силами и силами инерции, действующими в механизме. Этот метод широко применяется в теоретической механике.

Граничные условия бывают:

- кинематические. Они накладывают ограничение на перемещения тел, лишая их степеней свободы. В MSC.ADAMS носят название "шарниров".
- динамические. Приложение различных сил и моментов. Они не изменяют число степеней свободы. Подобные граничные условия многообразны.

Из пакета 3D-моделирования (SolidWorks) геометрия двигателя Д300 передается в среду MSC.ADAMS в формате "Parasolid" с сохранением массово-инерционных характеристик всей системы.

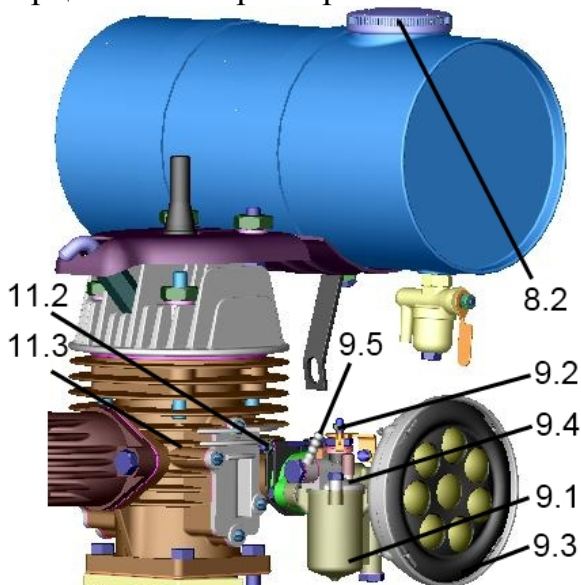


Рис. 8. Кинематические группы (вид 1)

Затем детали объединяются в кинематические группы (см. рис. 8, 9, 10, 11 и табл. 5), имеющие один центр масс и движущиеся в модели совместно по одному закону. Так кинематическая группа "Коленчатый вал", обозначенная в MSC.ADAMS, как "КВ" на самом деле состоит из большого числа жёстко связанных деталей или геометрий (Geometry). Объединение происходит следующим образом. Сначала выбирается базовая деталь группы, затем командой "Rename" изменяется принадлежность детали.

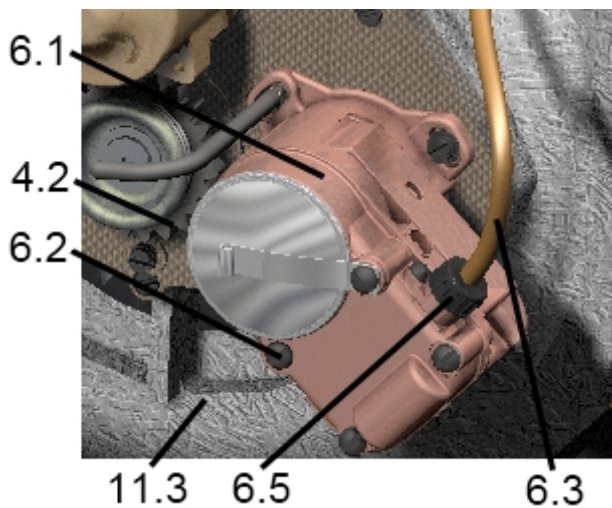


Рис. 9. Кинематические группы (вид 2)

Для разъяснения рассмотрим пример. Имеется две детали. Каждая представляет собой тело с физическими свойствами и геометрией: `.Model.KB.Solid1` и `Model.Part_2.Solid2`. По умолчанию всем импортированным телам (которым назначена в САД-пакете плотность материала) присваивается название "Part_#", а геометриям "Solid#". Заменяем название геометрии `.Part_2.Solid2` на `KB.Solid2`, затем удаляем пустую деталь `Part_2`, не содержащую геометрии.

Получаем одну деталь `.Model.KB` с двумя геометриями `Solid1` и `Solid2`. Для избегания путаницы, геометрии в пределах детали можно переименовать в соответствии с названиями исходных деталей, взятых, например, из спецификации.

Если детали внутри одной кинематической группы сделаны из разных материалов, то простое объединение всех деталей командой "Rename" приведёт к искажению массово-инерционных характеристик изделия, поскольку полученное после объединения тело будет состоять только из одного материала, поскольку в MSC.ADAMS материал связан с деталью ("Part"), а не с геометрией ("Geometry"). Если доля геометрий с другими материалами невелика (менее 5%), например для крепёжных болтов корпуса, можно объединить их командой "Rename", вычислив среднюю плотность материала так, чтобы общая масса осталась неизменной.

Также, если внешний вид модели не важен, можно вообще не включать мелкие геометрии (например, крепёж) в модель, учтя их в модели, соответственно увеличив плотность основных деталей, опять же ориентируясь на постоянство массы.

В обоих случаях мы внесём некоторое искажение в инерционные характеристики модели, поскольку массы будут распределены немного отменно от реальной конструкции.

Чтобы этого избежать, можно внутри одной кинематической группы сделать несколько подгрупп из деталей, сделанных из разных материалов. При этом общее название должно быть одинаково, например "Корпус_2740" для алюминиевых и "Корпус_7801" для стальных деталей корпуса. Это нужно для того, чтобы все подгруппы одной кинематической группы стояли рядом в древе модели. Внутри самой кинематической группы подгруппы объединяются связями "JF" ("замок") в центрах масс соответствующих подгрупп, но на кинематической схеме отображается только сама группа. Список входящих в кинематические группы подгрупп даётся отдельным списком. В пакете MSC.ADAMS для работы с составными кинематическими группами

предусмотрен инструмент "Build - Group", позволяющий объединить отдельные детали в связывающие их шарниры в отдельную группу и работать с ними совместно, например, отображать и скрывать.

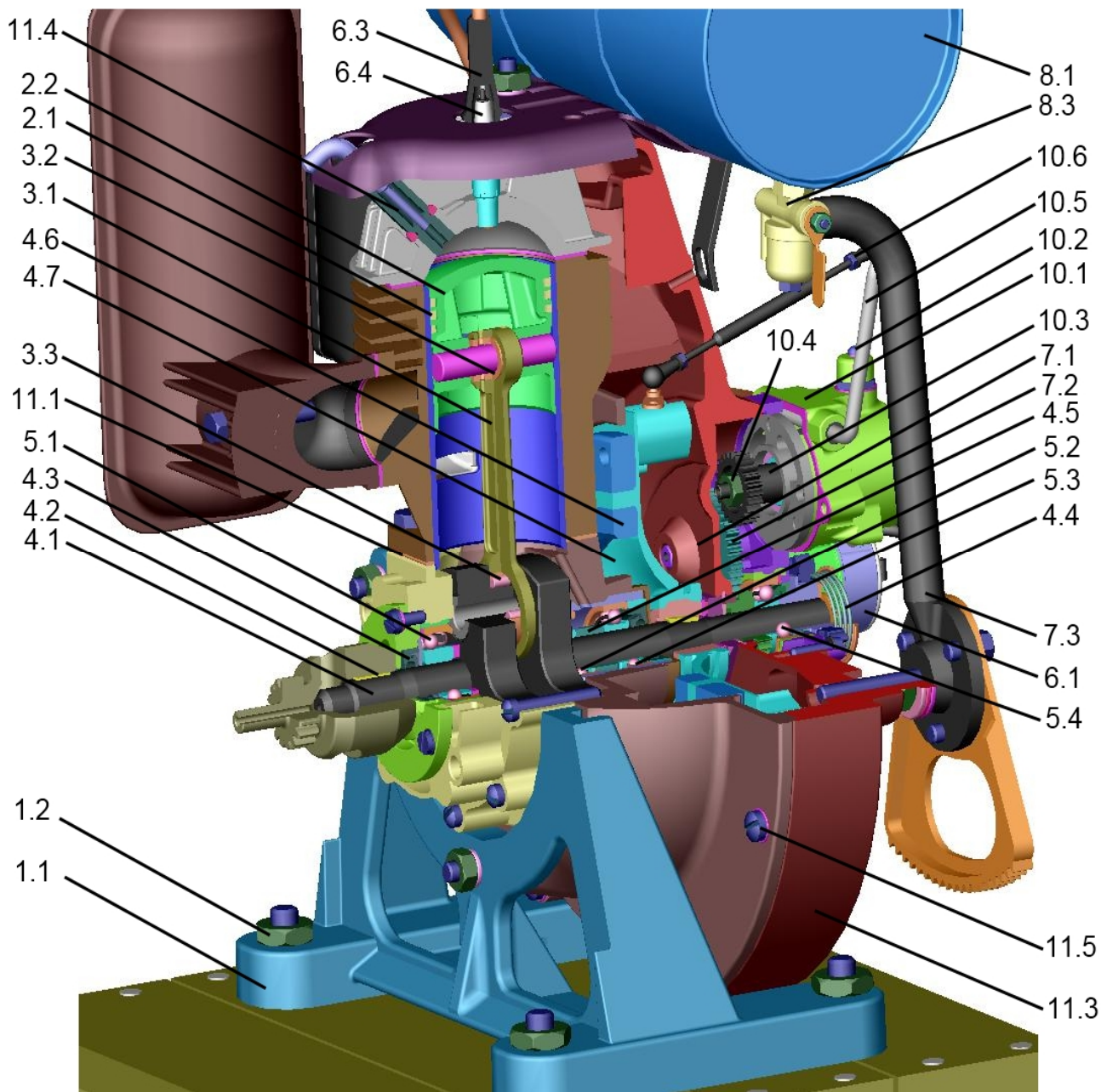


Рис. 10. Кинематические группы на 3D-модели двигателя (четверть-вырез)

В версии MSC.ADAMS 2010 и выше, наряду с классическим, присутствует также «ленточный» интерфейс, аналогичный используемому в пакете MS.Office 2007 и выше. Ленточный интерфейс установлен по умолчанию. Учитывая, что оба интерфейса равно функциональны, выбор зависит от личных предпочтений пользователя. В данной работе при описании взаимодействия пользователя с программой идёт ориентация на классический интерфейс. Чтобы переключиться к классическому виду интерфейса в меню "Settings" необходимо выбрать пункт "Interface Style" и затем подпункт "Classic".

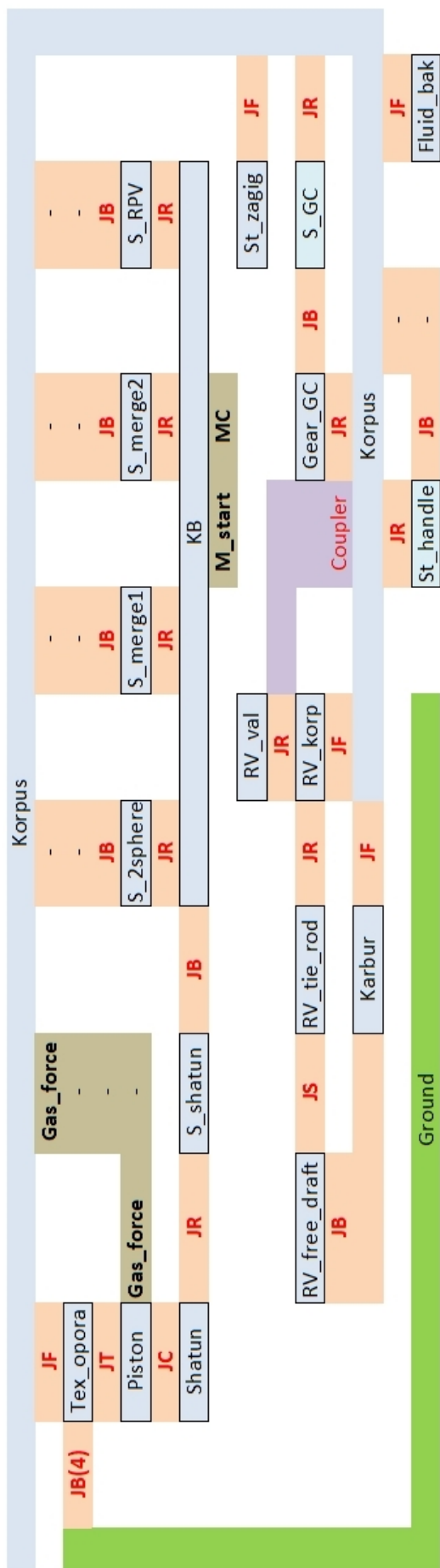


Рис. 11. Динамическая схема поршневого двигателя

MSC.ADAMS имеет блочную структуру и в соответствии с этим может быть сформирован в различных комплектациях, соответствующих всему спектру задач пользователя. Основными программными блоками являются:

ADAMS/View - это интерактивная графическая среда, позволяющая строить трёхмерные кинематические модели с использованием имеющейся библиотеки компонентов (как жёстких, так и упругих), соединений и т. д.; прикладывать нагрузки и налагать связи; передавать модели на решение в модуль *ADAMS/Solver* и просматривать результаты в виде графиков, таблиц и анимаций, отрисовки полученных векторных величин, в виде отмасштабированных векторов в месте их действия и т. п. Модуль позволяет также импортировать уже готовые модели из других систем проектирования (SolidWorks, КОМПАС, SIEMENS NX).

ADAMS/Solver - конвертирует построенную в *ADAMS/View* модель в уравнения движения и разрешает полученную систему. По запросу пользователя возможен вывод не только сил, перемещений, скорости, ускорений, но и дополнительной информации для дальнейшего ее использования в конечно-элементном и других видах анализов.

ADAMS/Flex - позволяет создавать деформируемые составляющие модели на основе имеющихся данных о собственных частотах. Деформируемость конструктивных частей может существенно влиять на поведение объекта исследования. Все необходимые данные для учёта деформируемости деталей могут быть импортированы из таких конечно-элементных комплексов, как ANSYS, ABACUS, MSC.NASTRAN.

Табл. 5. Расшифровка обозначений на динамической схеме (рис. 8, 9, 10, 11)










№	Группа		№	Деталь		ρ, кг/м ³
	рус	eng		рус	eng	
1	Техническая подставка	Tex_opora	1.1	Техническая подставка 7080	Tex_opora_7080	7080
			1.2	Техническая подставка 7801	Tex_opora_7801	7801
2	Поршневая группа	Piston	2.1	Поршень	Piston_self	2740
			2.2	Поршневые кольца	Piston_colco	7801
3	Шатунная группа	Shatun	3.1	Шатун	Shatun_self	7801
			3.2	Верхний вкладыш шатуна	Shatun_bearing_up	2000
			3.3	Подшипник шатун-КВ	S_shatun	7801
4	Группа коленчатого вала	КВ	4.1	Коленчатый вал (КВ)	КВ	7080
			4.2	Стальные детали КВ	КВ_7801	7801
			4.3	Резиновые детали КВ	КВ_1150	1150
			4.4	Пружина КВ	КВ_Prygina	7750
			4.5	Распорная втулка КВ	КВ_Vtylka_raspor	2740
			4.6	Маховик	Маховик	7801
			4.7	Крыльчатка охлаждения	Cooler	5779
5	Подшипники на валу	S_2sphere, S_merge1, S_merge2, S_RPV	5.1	Левый двухрядный	S_2sphere	7801
			5.2	Средний 1	S_merge1	7801
			5.3	Средний 2	S_merge2	7801
			5.4	Правый	S_RPV	7801
6	Система зажигания	St_zagig	6.1	Магнето	Magneto	2740
			6.2	Стальные детали магнето	Magneto_7801	7801
			6.3	Провод свечи зажигания	Provod_svechi	1150
			6.4	Свеча зажигания	Svecha	2740
			6.5	Колпачок магнето	Cap_magneto	900
7	Система запуска	S_GC, Gear_GC, St_handle	7.1	Подшипник шестерни запуска	S_GC	7801
			7.2	Шестерня запуска	Gear_GC	7801
			7.3	Рукоять запуска	St_handle	7801
8	Система топливного бака	Fluid_bak	8.1	Топливный бак	Fluid_bak_self	7750
			8.2	Крышка топливного бака	Fluid_bak_cover	2000
			8.3	Штуцер топливного бака	Fluid_bak_shtycer	2740
9	Карбюратор	Karbur	9.1	Корпусные детали	Karb	2000
			9.2	Стальные детали	Karb_7801	7801
			9.3	Воздушный фильтр	Karb_air_filter	900
			9.4	Крышечка карбюратора	Karb_fluid_cover	2740
			9.5	Топливный шланг	Karb_fluid_shlang	1150
10	Регулятор оборотов	Reg_vel	10.1	Корпус регулятора	RV_korp	2740
			10.2	Стальные детали регулятора	Reg_vel_7801	7801
		val	10.3	Вал регулятора	RV_val	3500
			10.4	Гайка на валу регулятора	Reg_vel_val_gaika	7801
		free_draft	10.5	Свободная тяга	RV_free_draft	7801
		tie_rod	10.6	Рычаг	RV_tie_rod	7801
11	Корпусные детали	Korpus	11.1	Асбестовые детали	Korpus_500	500
			11.2	Резиновые детали	Korpus_1150	1150
			11.3	Алюминиевые детали	Korpus_2740	2740
			11.4	Декомпрессионный краник	Korpus_7750	7750
			11.5	Стальные детали	Korpus_7801	7801

ЗАНЯТИЕ 3. ПРИЛОЖЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Согласно общему алгоритму проектирования, после создания все кинематические группы соединяются между собой идеализированными шарнирами, либо псевдогибкими связями. Шарниры (Joints) – это математические ограничения взаимного перемещения тел, а псевдогибкие связи – это элементы, имеющие конечную жёсткость. Сила их реакции зависит от относительного смещения деталей. Простейшим примером псевдогибкой связи является пружина.

Для работы данной модели двигателя Д300 достаточно 56 связей, которые маркируются следующим образом (см. табл. 6) и четырёх нагрузок (см. табл. 7).

Табл. 6. Маркировка связей в модели двигателя Д300

Маркировка	Тип	Значение
JR, 	Вращательный	Одна вращательная степень свободы
JF, 	Неподвижный	Убирает все 6 степеней свободы. Заделка
JT, 	Поступательный	Одна поступательная степень свободы
JS, 	Сферический	Три вращательные степени свободы
JB, 	Гибкая муфта	Жесткости и коэффициенты демпфирования по всем поступательным и вращательным осям
G, 	Земля	Абсолютно неподвижное тело. С ним связана центральная система координат
Spring, 	Пружина	Жесткость и коэффициент демпфирования по одной поступательной оси
JC, 	Цилиндрический	Одна поступательная и одна вращательная степени свободы
JK, 	Coupler	Связь вращательных или поступательных шарниров через передаточный коэффициент

Например, запись JC_piston_shatun означает "цилиндрический шарнир, соединяющий шатун с поршнем".

Псевдогибкие соединения применены для моделирования:

а). Подшипников. При этом наружное кольцо соединяется с корпусом двигателя посредством неподвижного соединения типа «замок» (если материалы деталей одинаковы, следует использовать объединение через функцию "Rename"). Внутреннее кольцо подшипника соединяется с коленчатым валом аналогично «замком», что моделирует запрессовку кольца в опору на реальном двигателе. Сепаратор подшипника, выполненный за одно целое с телами качения, соединяется вращательным шарниром с наружным кольцом и элементом "Bushing" - с внутренним кольцом. Такая схема обеспечивает свободное проворачивание с учётом податливости подшипника. К вращательному шарниру одного из подшипников присоединён генератор вращения, обеспечивающий постоянство частоты вращения коленчатого вала двигателя.

- б). Крепления рукояти запуска стартерной системы двигателя.
 в). Соединения тяги регулятора оборотов с карбюратором.
 Примеры приложения и наименования соединений даны в табл. 7.

Табл. 7. Примеры приложения и наименования соединений

№	Соединение	№	Соединение	№	Соединение
1	JB_Tex_opora_G_1	19	JB_BK_RPV	37	JF_Fluid_bak_Korpus
2	JB_Tex_opora_G_2	20	JR_separator_sphere_RPV	38	JF_Karb_Korpus
3	JB_Tex_opora_G_3	21	JR_separator_GC	39	JF_St_zagig_Magneto_7801
4	JB_Tex_opora_G_4	22	JB_center_gear	40	JF_St_zagig_Magneto_korpus
5	JR_separator_NK2	23	JF_prygina_val	41	JF_Reg_vel_7801
6	JB_BK2_separator	24	JR_tie_rod_RV	42	JF_Tex_opora_7080
7	JR_start_cover	25	JS_free_draft_tie_rod	43	JF_Korpus_1150
8	JB_handle	26	JB_free_draft_ceplalo	44	JF_Korpus_7750
9	JR_merge_2	27	JR_val_RV	45	JF_Piston_Colco_Piston
10	JR_merge_1	28	JF_fluid_bak_shtycer	46	JF_KB_1150
11	JB_merge_2	29	JF_fluid_bak_cover	47	JF_KB_Vtylka_raspor
12	JB_merge_1	30	JF_karb_fluid_cover	48	JF_Korpus_500
13	JB_shatun	31	JF_karb_fluid_shlang	49	JF_Korpus_Tex_opora
14	JR_shatun_down	32	JF_reg_vel_val_gaika	50	JF_KB_7801
15	JF_shatun_up	33	JF_st_zagig_Cap_magneto	51	JF_Korpus_7801
16	JC_shatun_up	34	JF_Maxovik_KB	52	JF_RV_korp_korpus
17	JT_piston_korpus	35	JF_Cooler_KB	53	JF_Svecha_Korpus
18	JF_provod_svechi	36	JF_karb_air_filter	54	JF_Karb_7801
...					
№	Передача	Ведущий шарнир	Ведомый шарнир		
55	JK_center_gear	JR_S_RPV_Korpus	JR_S_GC_Korpus		
56	JK_val_RV	JR_S_GC_Korpus	JR_RV_val_korp		
	Нагрузка	Объект действия	Тип		
1	Gas_force Газовая сила	Piston - Korpus	Двусторонняя сила F_r		
2	MC Момент сопротивления	KB	Момент		
3	M_start Момент запуска	KB	Момент		
4	Friction	JT_piston_korpus	Сила трения		

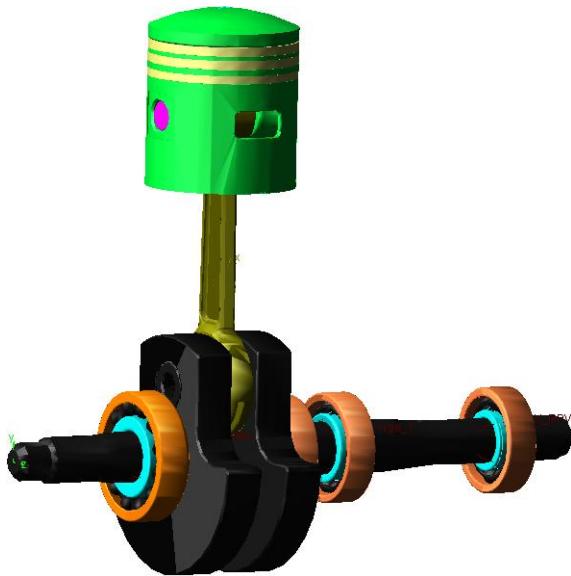


Рис. 12. Упрощенная модель КШМ двигателя Д300

Прежде чем оснащать соединениями и выполнять расчёт полной модели, рекомендуется провести предварительный анализ частичной модели (рис. 12), включающей детали поршневой, шатунной групп и коленчатого вала двигателя. Коленчатый вал крепится шарнирами "JR" к элементу "Ground" в точках расположения подшипников на реальной модели двигателя. Все деформируемые элементы (только в рамках частичной модели) заменяются абсолютно жёсткими телами и идеализированными ограничениями.

Расчёт частичной модели проводится при следующих допущениях:

а). Двигатель имеет постоянную частоту вращения коленчатого вала, равную 3000 об/мин. В MSC.ADAMS это постоянство обеспечивает элемент "Motion" – генератор движения, приложенный к шарниру JR_S_2sphere_Korpus. При дальнейших расчётах данный элемент будет деактивирован;

б). Предполагается, что индикаторная диаграмма двигателя, полученная по результатам теплового расчёта, не изменяется в процессе динамического анализа;

в). В элементах конструкции отсутствуют вибрации и прочие возмущения, а также диссипативные силы, сила тяжести.

Единственной внешней нагрузкой, учитываемой в расчёте, является сила давления газов P_2 в камере сгорания двигателя, которая заменяется сосредоточенной двунаправленной силой F_2 . Чтобы получить силу F_2 на основе индикаторной диаграммы, необходимо, во-первых, построить таблицу, в которую следует записать зависимость величины P_2 от угла поворота коленчатого вала φ с определённым шагом (10 градусов). Если индикаторная диаграмма построена не от угла поворота коленчатого вала, а от величины хода поршня, её надо развернуть, используя связь между величиной хода поршня S_n и углом поворота коленчатого вала φ

$$S_n = R \left((1 - \cos \varphi) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\varphi) \right).$$

Следует обратить внимание, что отсчёт в данном выражении идёт от ВМТ. Во-вторых, необходимо вычесть из величины индикаторного давления величину атмосферного давления, поскольку сила, действующая на поршень, определяется разностью давлений над поршнем и под ним (в картерной камере двигателя). После этого полученные значения приводятся к размерности силы [Н] путём умножения на площадь поршня A_n

$$F_r = P_r A_n.$$

При подготовке к импорту в MSC.ADAMS сплайна газовой силы, справа и слева к исходной развёрнутой индикаторной диаграмме добавляется ещё по одному циклу (для четырёхтактного двигателя она сжимается вдвое вдоль оси абсцисс). Подобная схема позволяет моделировать многоцилиндровые двигатели, а также рассчитывать неограниченное число оборотов коленчатого вала.

После сохранения текстовый файл, содержащий два столбца цифр, где первый содержит углы поворота вала газораспределительного механизма, а для двухтактного двигателя - просто коленчатого вала; второй – соответствующие значения газовой силы F_2 , импортируется в MSC.ADAMS в виде сплайна (Spline) через **"File Type Test Data (*.*)"**. Окно выбора указанных параметров показано на рис. 13. При этом в поле **"Model Name"** следует выбрать название 3D-модели. Для чего необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши в соответствующем поле и в появившемся контекстном меню выбрать **"Model – Guesses – Название модели"**. Проверить правильность импорта можно через меню **"Build – Data Elements – Spline – Modify..."** Переименуйте сплайн как «Gas_force_spline» через меню **"Edit – Rename"**.

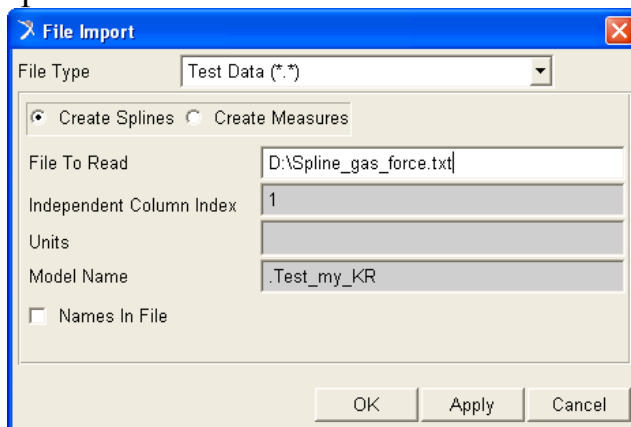


Рис. 13. Окно выбора параметров для импорта таблицы газовой силы F_2

Для задания зависимости газовой силы от угла поворота вала газораспределительного механизма, необходимо связать последний с модельным временем **"time"**. Сделать это можно, например, с помощью функционального датчика, внешний вид графика которого показан на рис. 14. Рекомендуется назвать данный датчик «Ugol_val_loc». Функциональные датчики задаются через меню **"Build – Measure – Function – New"**. Для работы с углами поворота следует сменить **"Math Functions"** ("математические функции") на **"Displacement"** ("функции перемещений"), после чего (если модель создавалась в плоскости XY) выбрать **"B321 Sequence: 1st Rotation"** (2st или 3st Rotation для других плоскостей). Для выбора маркера, ориентация которого будет измеряться, целесообразно воспользоваться помощником **"Assist..."** Для перевода угловых значений из радиан в градусы выражение умножается на **"180/π"**. Тогда функция датчика будет выглядеть следующим образом

$$\text{ROLL}(\text{mar_val_measure}, \text{Maxovik.cm}) * 180 / \text{PI}$$

где "ROLL" – выбранная функция, измеряющая угловое смещение маркера относительно оси, а "mar_val_measure" – это маркер, находящийся на коленчатом валу двигателя. "Маховик.cm" в данном случае - это выбранный в качестве локальной системы координат маркер, относительно которого происходит отсчёт.

Для того, чтобы в поле появился график, необходимо выполнить расчёт. Для этого следует задать время расчёта "**End Time**" в секундах, соответствующее двум оборотам коленчатого вала двигателя

$$2T = 120/n$$

а число шагов "**Steps**" равное 720 - по шагу на каждый градус поворота коленчатого вала.

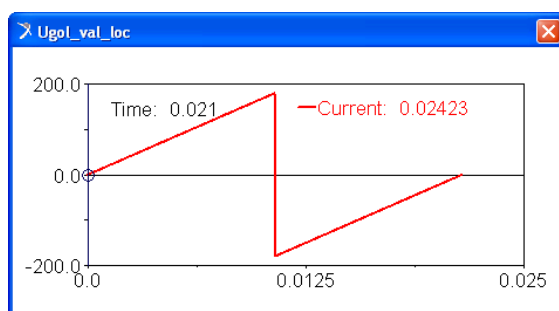


Рис. 14. График углового положения коленчатого вала

В случае, если график идёт не от нуля, требуется повернуть маркер "mar_val_measure" (или другой используемый) на требуемое число градусов. Для этого выделите его левым щелчком мыши и воспользуйтесь командой "Edit – Move..." Укажите в подразделе "Rotate" ("вращение") угол +/- 90 градусов с зависимости от направления поворота и щелчком по пиктограмме поверните маркер относительно оси Z (если модель изначально строилась в плоскости XY).

Создайте силу, направленную вниз по шатуну (вдоль оси цилиндра), соединяющую поршень и корпус двигателя. Переименуйте её в «Gas_force». Скопируйте функцию из свойств датчика «Ugol_val_loc» в буфер обмена. Через пункт "**Modify**" войдите в меню свойств вновь созданной силы. В поле "Function" нажмите на многоточие (...) и в открывшемся редакторе найдите функцию "Spline – Cubic Fitting Method". Воспользуйтесь помощником ("Assist...") чтобы связать эту силу с импортированным ранее сплайном. Примерный вид диалогового окна показан на рис. 15. В поле "First Independent Variable" ("первая независимая переменная") вставьте сохранённую функцию датчика «Ugol_val_loc», являющуюся зависимостью углового положения вала газораспределительного механизма (или коленчатого вала для двухтактного двигателя Д300) от времени. В поле "Spline Name" указывается название импортированного сплайна газовой силы.

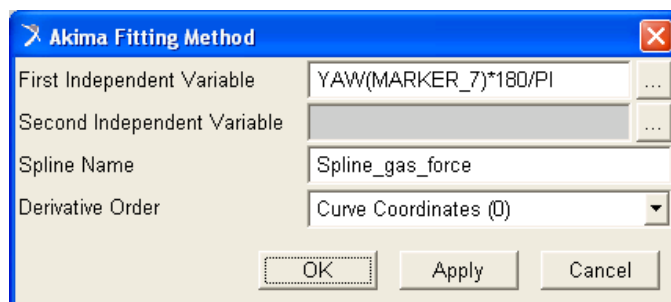


Рис. 15. Диалоговое окно задания газовой силы F_2

Формула газовой силы выглядит следующим образом:

$CUBSPL(ROLL(mar_val_measure, Maxovik.cm)*180/PI,0, Gas_force_spline, 0)$

График созданной силы можно отобразить, воспользовавшись командой "Measure" из контекстного меню, появляющегося при щелчке правой кнопкой мыши на пиктограмме силы.

Для снятия результатов расчёта необходимо добавить в модель датчики. Некоторые из них активны по умолчанию, в частности те, которые показывают перемещение, скорость и ускорение поршня. Для их построения можно использовать модуль ADAMS/PostProcessor. Требуется отметить, что все графики должны быть построены в зависимости от угла поворота коленчатого вала. Соответствующий функциональный датчик «Ugol_val» создаётся аналогично датчику угла поворота вала газораспределительного механизма, но в качестве функции выбирается угловое перемещение "Displacement – AZ". Если график начинается не из нуля, его нужно сместить, добавив слагаемое соответствующей величины. Приблизительный вид функции:

$AX(mar_val_measure)$

При этом в поле "Units" следует установить значение «Angle» (градусы). После завершения полного расчёта необходимо перейти в основное меню модуля ADAMS/PostProcessor и сначала установить в качестве "Independent Axis" (ось абсцисс) угол поворота коленчатого вала. Для этого следует, во-первых, в поле "Source" (источник) выбрать тип "Measures" (датчики), во-вторых, переставить метку с поля "Time" (от времени) на поле "Data" (от данных) и выбрать в появившемся окне датчик «Ugol_val». Далее строятся графики зависимости кинематических параметров, таких как перемещение, скорость и ускорение поршня в зависимости от угла поворота коленчатого вала. В качестве примера, на рис. 16 приведён график перемещения поршня двигателя Д300, а также панели его редактирования.

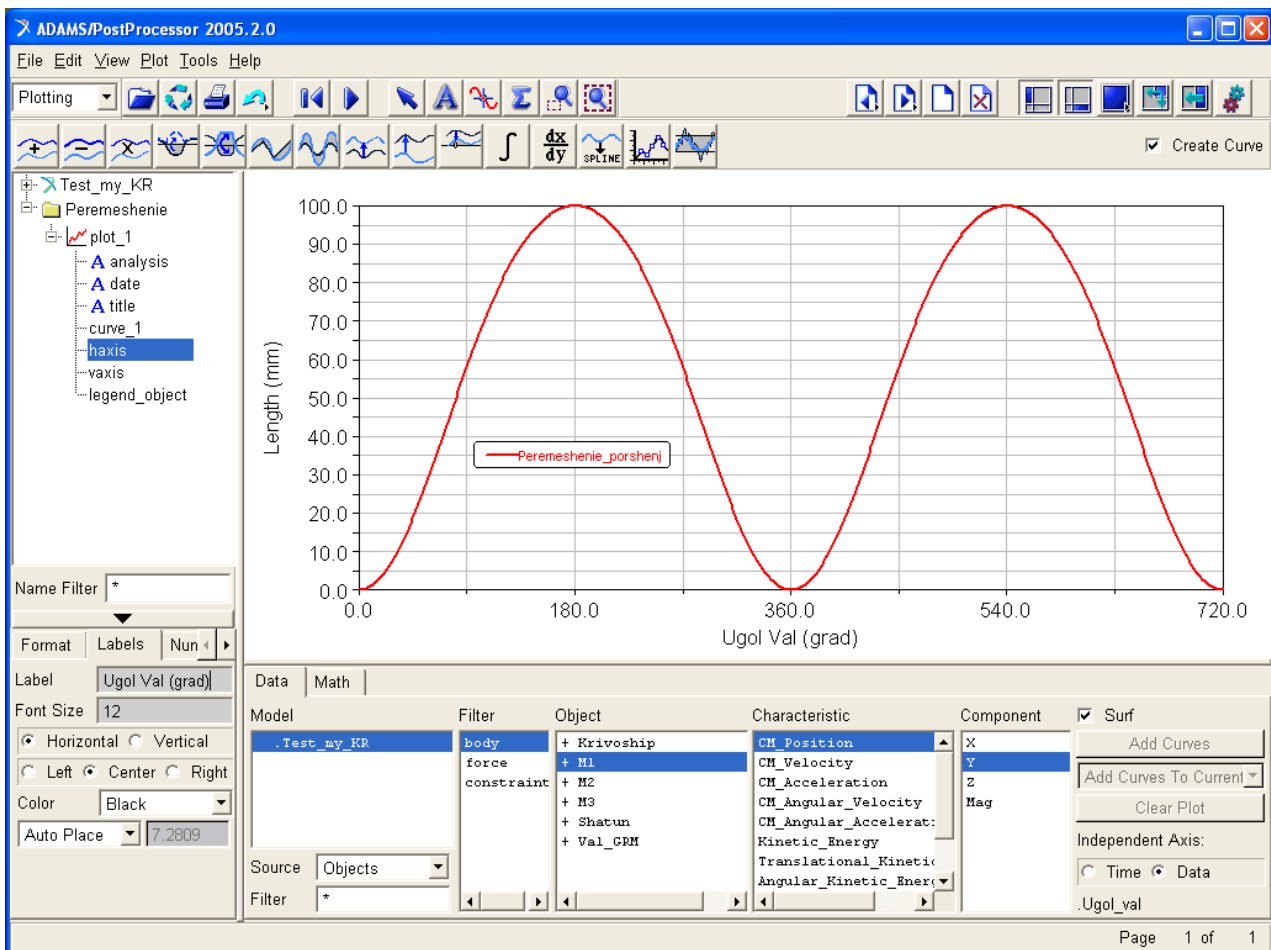







Рис. 16. Диалоговое окно редактирования графиков в модуле ADAMS/PostProcessor

Обратите внимание, что при нажатии на кнопку закрытия графика  в ADAMS/View сам график не удаляется. Его всегда можно отобразить снова командой "Build - Measure - Display..." и выбрав название датчика из списка.

На примере рис. 16 рассмотрим последовательность построения графиков. В левой части экрана находится древо построения, состоящее из страниц ("page"). Для каждого графика целесообразно создавать свою страницу . Переименуйте страницу «page_1» в «Peremeshenie». В нижней части экрана расположен инструмент работы с данными. На вкладке "Data" в поле "Source" выберите "Objects" (объекты). В нижнем поле "Filter" оставьте «*», что означает доступ ко всем объектам. В верхнем поле "Filter" выберите "body" (тела или звенья), в поле "Object" выберите piston_self. В поле "Characteristic" (характеристика) выберите CM_Position (положение центра масс), а в поле "Component" (ось) выберите ось Y. Поставьте галочку "Surf", чтобы в поле появился график, затем уберите её, чтобы можно было отредактировать внешний вид графика.

Сначала добейтесь правильной ориентации графика. Для этого воспользуйтесь панелью редактирования графиков . Сначала необходимо добиться того, чтобы график шёл из нулевой точки. Сделать это можно с помощью инструмента . Нажмите на иконку, затем на график. Появится копия графика, идущая из нулевой точки. Старый график нужно удалить, например, выделив его и нажав сочетание клавиш Ctrl+X. Если требуется (для

согласования с классическим расчётом) график можно инвертировать относительно оси абсцисс с помощью инструмента .

Снова вернитесь к дереву построения. На странице «Peremeshenie» откройте свойства графика ("Plot_1"). Выберите пункт "analysis" (название расчётной сессии). В нижнем левом углу появится панель свойств, позволяющая выполнить тонкую настройку данного пункта. Сотрите текст «Analysis: Last_Run» в сером поле, поскольку согласно правилам оформления протокола эксперимента, его не должно быть на графике. Также поступите с пунктами "Date" (дата) и "Title" (заголовок). В свойствах кривой (Curve_1) в поле "Legend" (легенда) укажите название графика «Peremeshenie_porshenj». В свойствах горизонтальной оси "haxis" на вкладке "Format" снимите флажок "Auto Scale" и задайте вручную диапазон по оси абсцисс от 0 до 720 градусов. На вкладке "Labels" в поле "Label" введите подпись по оси "Ugol Val (grad)". В поле "Font Size" укажите размер шрифта. Учтите, что подписи на графиках должны быть на два пункта меньше, чем основной текст, т.е., если текст имеет размер 14 пунктов, то подпись должна быть размером 12 пунктов. Тот же размер шрифта установите для цифр на вкладке "Numbers". Также измените размер подписи и цифр для оси ординат "vaxis". Аналогичным образом постройте графики скорости (CM_Velocity) и ускорения (CM_Acceleration) поршня. Приблизительный внешний вид остальных графиков можно посмотреть в расчётном примере.

Жесткостные и демпфирующие характеристики удобно задавать в параметрическом виде. Пример задания свойств дан на рис. 17. Значения параметров конструкторских переменных "Design Variable" приведены в таблице 8.

Создать конструкторскую переменную можно в меню "Build", а также напрямую, нажав правой кнопкой в поле жёсткости или демпфирования элемента "Bushing" и выбрав в контекстном меню "Parameterize" и далее "Create" для создания новой переменной или "Reference" для добавления существующей в модели.

Легко изменять значения конструкторских переменных (и других объектов, таких как части, маркеры, точки, шарниры, силы и генераторы движения) можно из табличного редактора MSC.ADAMS, который доступен из меню "Tools - Table Editor... - Variables".

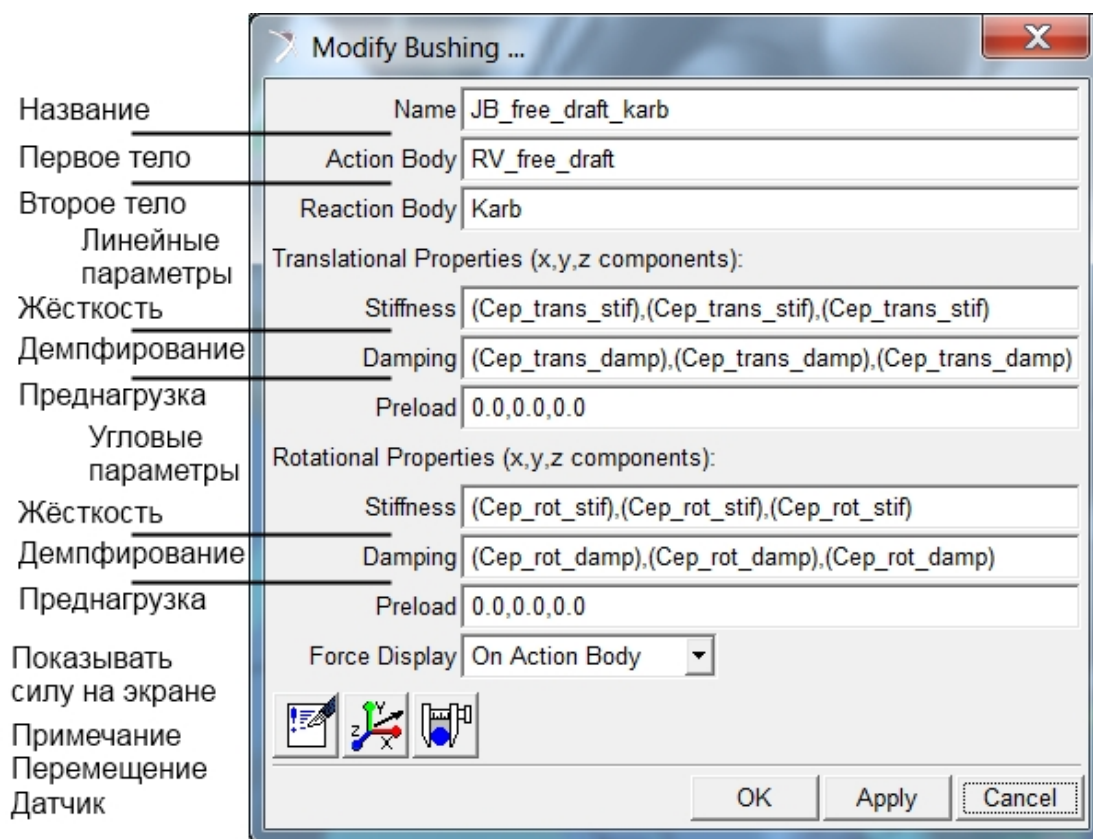


Рис. 17. Пример определения свойств деформируемой связи JB

Табл. 8. Начальные значения конструкторских переменных

№	Design variable	Значение	№	Design variable	Значение
1	Trans_stif_opor	3000.0	19	Shatun_rot_stif	1.0E+005
2	Trans_damp_opor	5.0E-002	20	Shatun_rot_damp	50.0
3	Rot_stif_opor	1000.0	21	SphRPV_trans_stif	1.5E+004
4	Rot_damp_opor	3.0	22	SphRPV_trans_damp	0.5
5	Trans_stif_2sph	1.5E+004	23	SphRPV_rot_stif	1.0E+005
6	Trans_damp_2sph	0.5	24	SphRPV_rot_damp	50.0
7	Rot_stif_2sph	1.0E+005	25	Gear_trans_stif	1.0E+004
8	Rot_damp_2sph	50.0	26	Gear_trans_damp	5.0E-002
9	Handle_trans_stif	1.0	27	Gear_rot_stif	50.0
10	Handle_trans_damp	5.0E-002	28	Gear_rot_damp	3.0
11	Handle_rot_damp	3.0	29	SST_stif	20.0
12	Handle_rot_stif	50.0	30	SST_damp	0.1
13	SMerge_trans_stif	1.5E+004	31	Cep_trans_stif	500.0
14	SMerge_trans_damp	0.5	32	Cep_trans_damp	0.5
15	SMerge_rot_stif	1.0E+005	33	Cep_rot_stif	1.0
16	SMerge_rot_damp	50.0	34	Cep_rot_damp	5.0
17	Shatun_trans_stif	1.5E+004	35	Sgear_rot_stif	50.0
18	Shatun_trans_damp	0.5	36	Sgear_rot_damp	3.0

Для силы трения в свойствах шарнира между поршнем и гильзой цилиндра двигателя следует выбрать параметр "только скольжение" ("Effect - Striction only"), коэффициент динамического трения ("Mu Dynamic") 0.3.

ЗАНЯТИЕ 4. ПРОВЕДЕНИЕ РАСЧЁТА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Далее рассмотрим образование крутящего момента на коленчатом валу двигателя. В теоретическом расчёте сила S , приходящая по шатуну, делится на два компонента: действующую по оси коленчатого вала K и перпендикулярно ей T .

$$S = P / \cos\beta,$$

где P - суммарная сила на поступательно движущиеся массы, а β - угол между шатуном и осью цилиндра двигателя; φ - угол поворота коленчатого вала.

Сила, направленная по радиусу коленчатого вала (рис. 18), вычисляется следующим образом:

$$K = P \cdot \cos(\varphi + \beta) / \cos\beta.$$

Тангенциальная сила T , направленная по касательной к окружности радиуса коленчатого вала (см. рис. 18), определяется в виде:

$$T = P \cdot \sin(\varphi + \beta) / \cos\beta.$$

В MSC.ADAMS эти силы получают при математической обработке сил в шарнире $JR_S_shatun_shatun$, связывающем нижнюю головку шатуна (через сепаратор подшипника) с шатунной шейкой коленчатого вала.

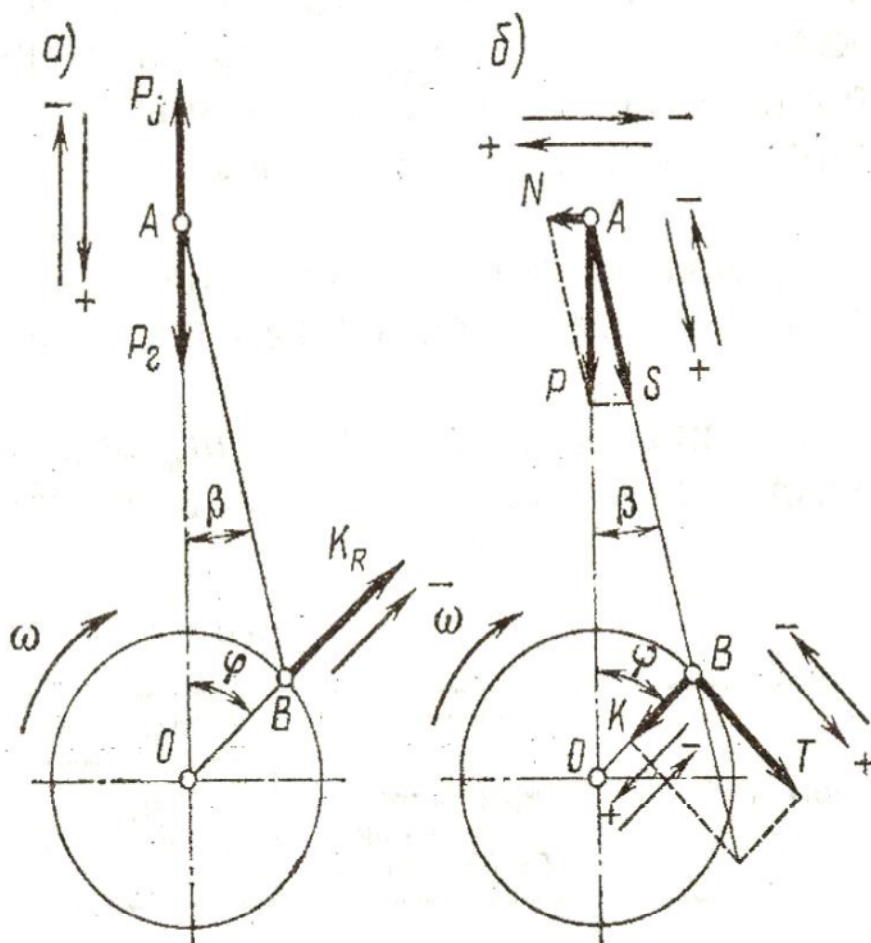


Рис. 18. Схема действия сил в КШМ: а – инерционных и газовых; б – суммарных

Сила T вычисляется по зависимости:

$$JOINT(.Engine_D300.JR_S_shatun_shatun, 0, 3, 0) * \sin(AX(ref_point)) - \\ JOINT(.Engine_D300.JR_S_shatun_shatun, 0, 4, 0) * \cos(AX(ref_point)),$$

где

$JOINT(.Engine_D300.JR_S_shatun_shatun, 0, 3, 0)$ – сила в шарнире по оси Y .

$JOINT(.Engine_D300.JR_S_shatun_shatun, 0, 4, 0)$ – сила в шарнире по оси Z .

$.Engine_D300$ - название модели.

$AX(ref_point)$ - угол поворота коленчатого вала двигателя.

ref_point - специальный маркер, созданный на конце коленчатого вала, чтобы привязывать к нему датчики и вычислять нагрузки. Может также называться $mar_val_measure$.

За ось вращения двигателя принимается ось коленчатого вала (ось X). Эти вычисления необходимы, поскольку решатель MSC.ADAMS выдает значения сил относительно фиксированных в пространстве осей, в то время как требуется получить их относительно вращающегося коленчатого вала.

Сила K вычисляется по зависимости:

$$-(JOINT(.Engine_D300.JR_S_shatun_shatun, 0, 3, 0) * \cos(AX(ref_point))) \\ + JOINT(.Engine_D300.JR_S_shatun_shatun, 0, 4, 0) * \sin(AX(ref_point))$$

Крутящий момент (см. рис. 18), действующий на коленчатом валу двигателя есть произведение силы T на плечо, равное длине (радиусу) кривошипа R (колена коленчатого вала):

$$M_{кр} = T \cdot R,$$

где $R = 0,034$ м (см. табл. 3)

Сила, действующая на шатунную шейку $R_{ш.ш.}$, равна:

$$R_{ш.ш.} = \sqrt{T^2 + P_k^2},$$

где P_k - сила по кривошипу с учётом силы инерции от вращающейся массы шатуна.

В MSC.ADAMS мы можем получить силу $R_{ш.ш.}$ в том же шарнире $JR_S_shatun_shatun$, связывающем шатунную шейку коленчатого вала с подшипником шатуна, как суммарную силу ("Component - Mag") в ADAMS/PostProcessor.

Расчет полной модели двигателя на установившемся режиме

Далее рассмотрен пример расчёта, который требуется провести с созданной моделью. Приведённые графики носят ознакомительный характер.

После проверки частичной модели двигателя можно приступить к расчёту полной модели. При этом проявятся некоторые отличия. Так, в

реальности обороты коленчатого вала не остаются строго постоянными, а колеблются возле равновесной величины (рис. 19).

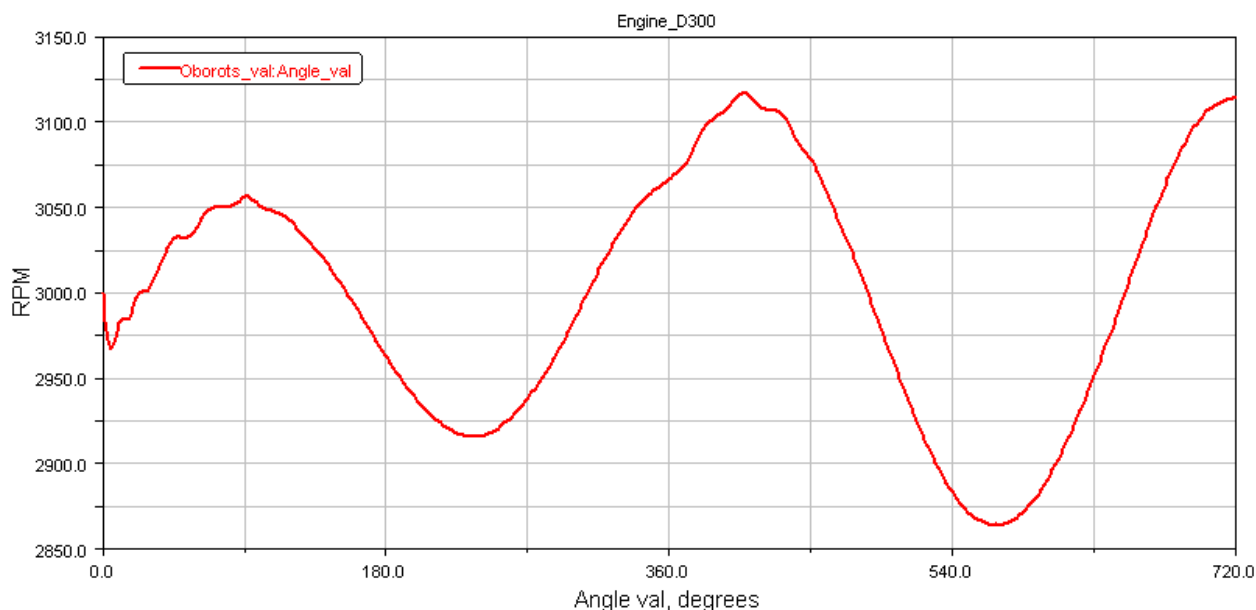


Рис. 19. Колебания частоты вращения коленчатого вала Д300 на установившемся режиме

При учёте податливости узлов подвески двигателя, становится возможным учёт вибраций, возникающих в двигателе, и оценка их влияния на работу механизма в целом.

Так, график вертикального перемещения поршня (рис. 20) изменяется незначительно. Некоторые отклонения в начальной части графика вызваны запаздыванием реакции элементов конструкции за счёт инерционности псевдогибких связей.

Кроме того, в расчёте полной модели учитываются: рассеяние энергии в подшипниках и сила трения для поршня, а также влияние силы тяжести.

График скорости меняется более существенно (рис. 21). При движении поршня вниз, под действием большой величины газовой силы происходит колебание скорости за счет податливости подшипниковых узлов и осадки двигателя на виброизолирующих опорах.

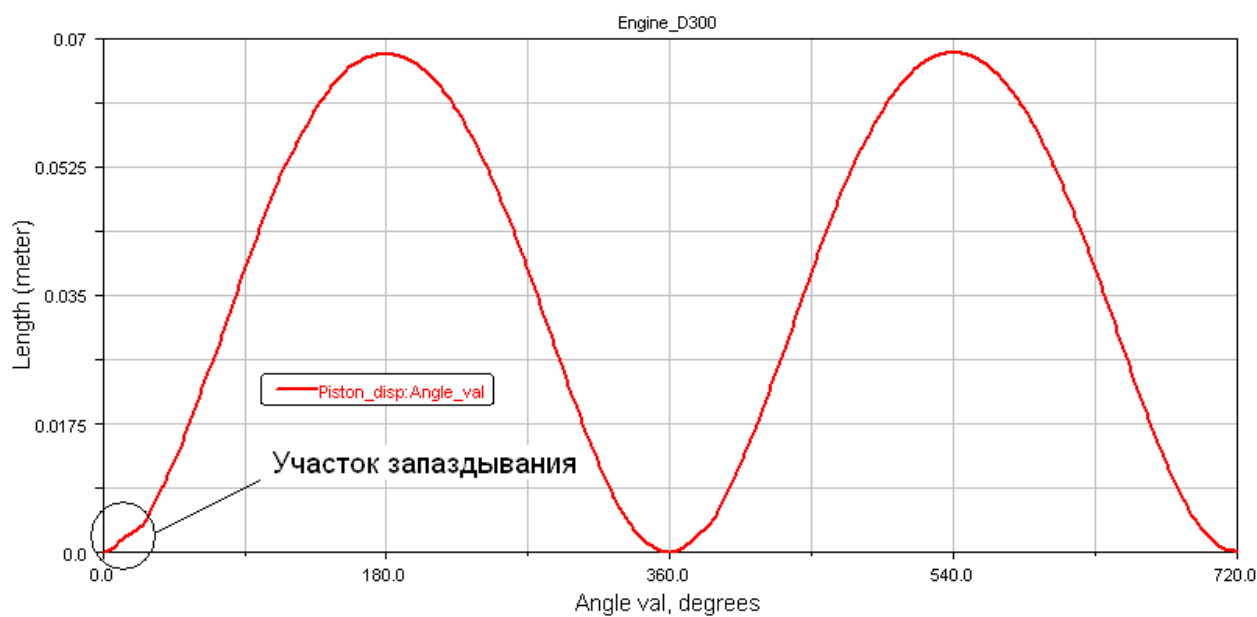


Рис. 20. График перемещения поршня по вертикальной оси

Кроме того, проявляются компоненты скорости, направленные по боковым осям, которые связаны с вибрациями всего двигателя (рис. 22).



Рис. 21. График скорости поршня по вертикальной оси

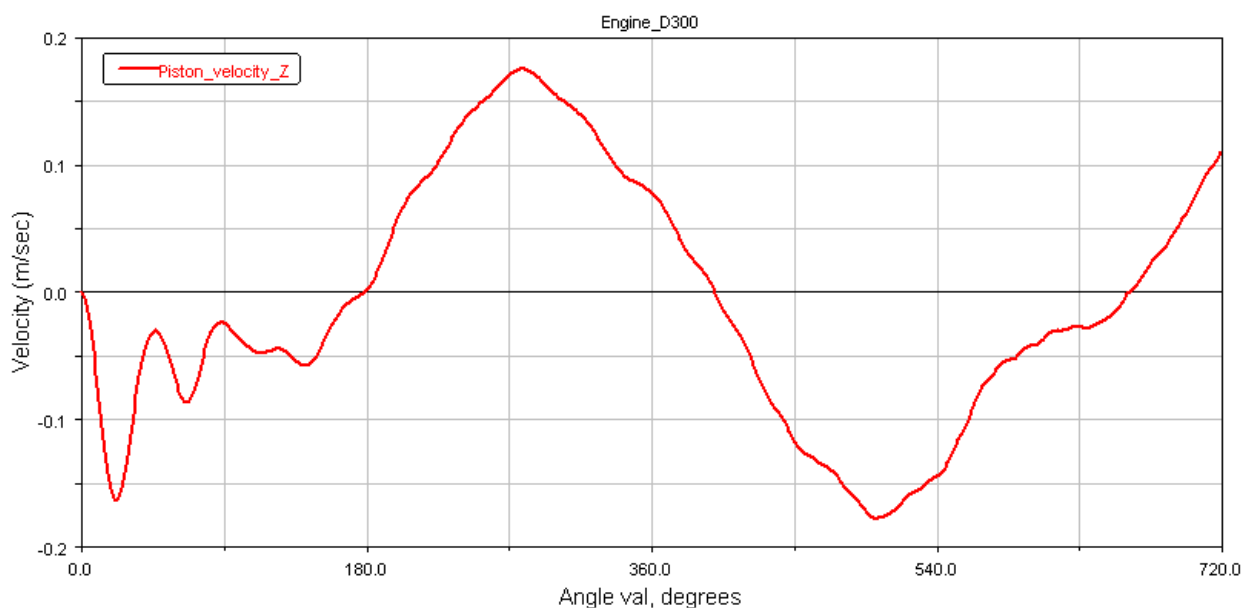


Рис. 22. График скорости поршня по боковой оси Z

График ускорения также значительно меняется. К теоретическому ускорению добавляется виброускорение, что приводит к росту амплитуды по сравнению с теоретическим: от 10000 м/с^2 в начальный момент до $7000...8000 \text{ м/с}^2$ при стабилизации частоты вращения вспомогательных элементов, при том, что максимальное теоретическое ускорение 4214 м/с^2 (рис. 23).

На рис. 23:

.Piston.CM_Acceleration.Y – ускорение поршня в глобальной системе координат, связанной с основой, на которые устанавливается двигатель.

.Perehodnik_user.CM_Acceleration.Y – вертикальное ускорение коленчатого вала в области отбора мощности потребителем.

SUBTRACT_piston_perehodnik – результат вычитания второго графика из первого. Есть исключение вибраций коленчатого вала в корпусе из вибраций поршневой группы.

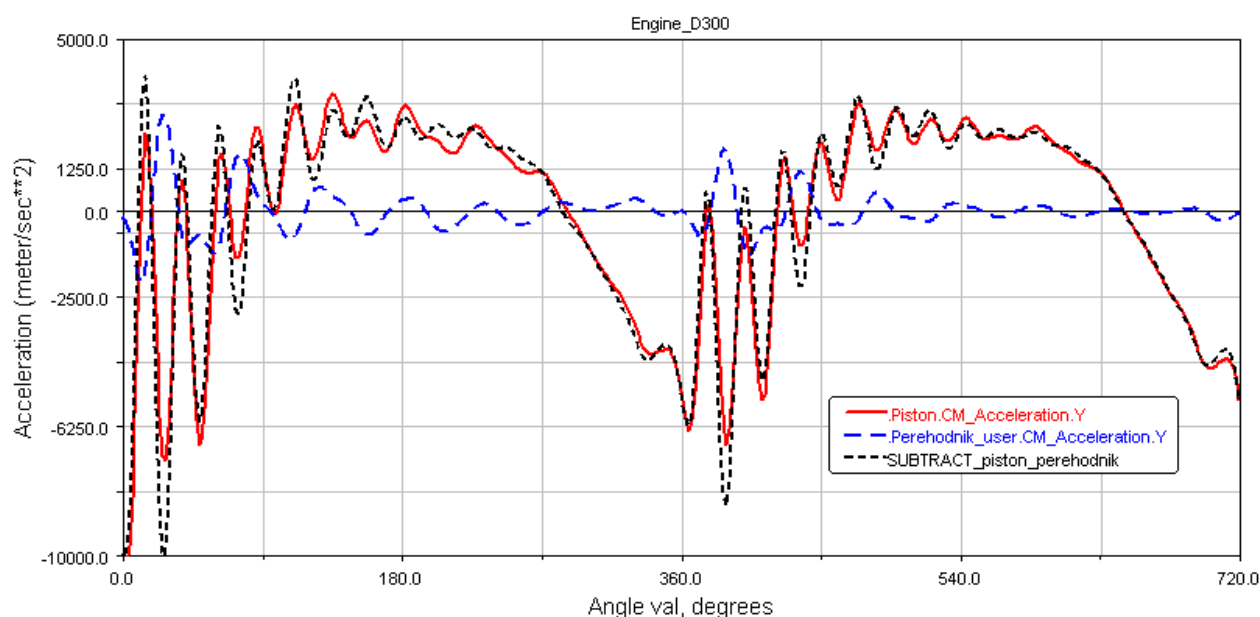


Рис. 23. График ускорения поршня по вертикальной оси Y

В силу вышеперечисленных причин изменяется и боковая сила (рис. 24):

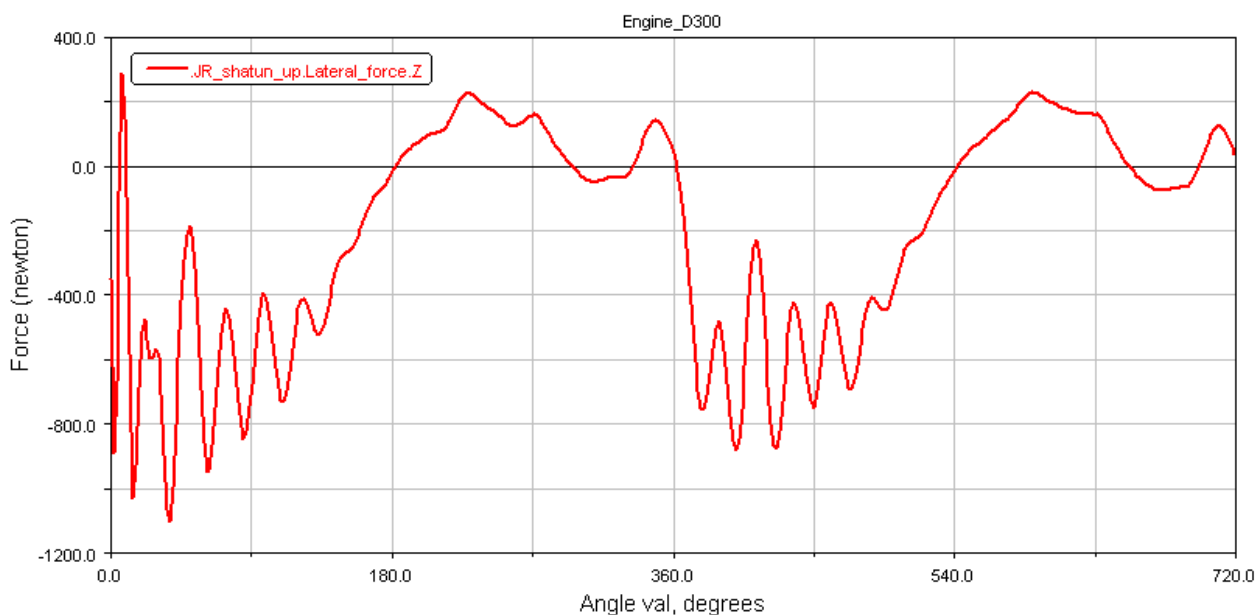


Рис. 24. График боковой силы

Поскольку двигатель Д300 одноцилиндровый, то имеется только один график нагрузки на шатунную шейку коленчатого вала (рис. 25). Поэтому невозможно оценить взаимное влияние различных цилиндров двигателя. По сравнению с теоретической, максимальная амплитуда силы выросла от 9400 до 14300 Н:



Рис. 25. График силы, действующей на подшипник шатунной шейки

График крутящего момента (рис. 26) вычисляется на основании силы T , действующей в шарнире, связывающем шатунную шейку с нижней головкой шатуна. Вследствие вибраций и, главное, работы регулятора оборотов двигателя, график крутящего момента деформируется. В данном случае итоговый график представляет собой сумму индикаторного момента, вибраций

и противомомента датчика оборотов, который можно представить в виде внешней нагрузки, например, электротормоза.



Рис. 26. График крутящего момента двигателя Д300

Мощность N_i вычисляется по крутящему моменту M_i , согласно формуле:

$$N_i = \frac{M_i \cdot n \cdot \pi}{3 \cdot 10^4}.$$

График, вычисленной таким образом, мощности, при условии примерного постоянства оборотов, повторяет в соответствующем масштабе график крутящего момента. Данный график не согласуется с графиком мощности, вычисленным на этом же режиме по бестормозному методу, поскольку в указанном методе не учитывается влияние внешней нагрузки. Однако, средние значения мощностей примерно совпадают:

Мощность, полученная по силе T , кВт	8,4
Мощность, полученная бестормозным методом, кВт	8,6
Расхождение, %	2,4

На рис. 27 сплошной линией показан расчет мощности двигателя Д300 по крутящему моменту на основе силы T , а пунктирной – бестормозным методом. Бестормозной метод исследования более подробно изложен ниже.

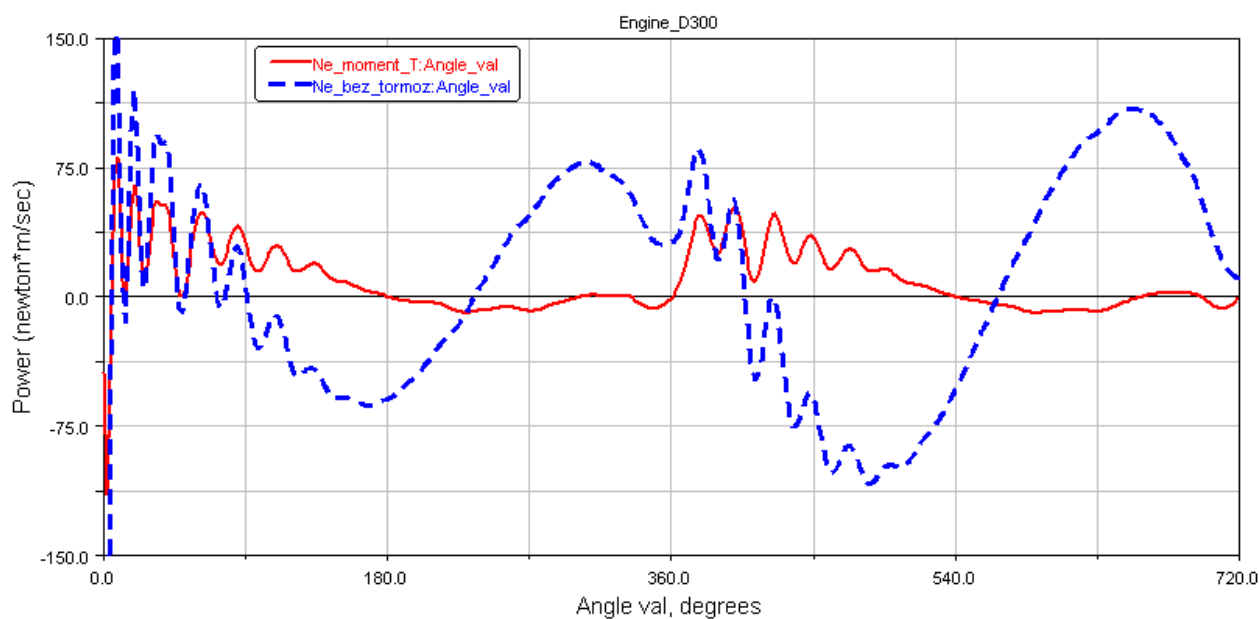


Рис. 27. Сравнение мощностей, полученных тормозным и бестормозным методами, при внешнем ограничении частоты вращения

Разгон и торможение двигателя. Бестормозной метод определения мощности двигателя

Индикаторный крутящий момент двигателя на динамических режимах определяется выражением:

$$M_i = M_M + J \frac{d\omega}{dt},$$

где M_i - индикаторный крутящий момент двигателя; M_M - момент механических потерь двигателя; J - приведенный момент инерции двигателя; $\frac{d\omega}{dt}$ - угловое ускорение коленчатого вала.

В условиях разгона двигатель загружается до полной цикловой подачи топлива, и его индикаторная работа затрачивается на преодоление инерционных сопротивлений и механических потерь. На основе уравнения моментов можно получить уравнение мощности:

$$N_e = \frac{(M_i - M_M) \cdot \omega}{1000} = \frac{J\omega}{1000} \cdot \frac{d\omega}{dt}.$$

Необходимым условием любого метода определения мощности двигателя должна быть сопоставимость с результатами тормозного определения.

Как показывают экспериментальные исследования дизельных и карбюраторных двигателей в условиях неустановившихся режимов, показатели рабочего цикла и основные показатели работы – мощность и топливная экономичность – заметно отличаются от их значений на установившихся режимах, получаемых в тормозных испытаниях.

При разгонах, например, дизельных двигателей без внешней нагрузки, на всех цилиндрах от холостого хода до полной цикловой подачи топлива,

угловые ускорения достигают значений 150...200 c^{-2} , что приводит к значительной деформации рабочего цикла и существенному отклонению показателей.

Одним из способов уменьшения деформации рабочего цикла при разгоне с полной цикловой подачей топлива является уменьшение числа работающих цилиндров за счет выключения части цилиндров. В этом случае ускорение разгона уменьшается и, соответственно, уменьшается различие между показателями работы двигателя в тормозных и бестормозных динамических режимах.

Наибольшее отклонение показателей рабочего цикла при разгоне по сравнению с их значениями в установившихся (тормозных) режимах наблюдается в первой половине разгона. Следовательно, уменьшение измерительного диапазона угловой скорости с выходом на номинальное её значение уменьшает погрешность метода.

Характер связи мощности и продолжительности разгона в измерительном интервале изменения ω определяется на основе уравнений:

$$N_e = \frac{M_e \cdot \omega}{1000} = \frac{J\omega}{1000} \cdot \frac{d\omega}{dt} \Rightarrow N_e dt = \frac{J}{1000} \omega \cdot d\omega.$$

В пределах малого, но конечного изменения угловой скорости $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ за период разгона t_p :

$$\begin{aligned} N_{e\text{cp}} \int_1^2 dt &= \frac{J}{1000} \int_1^2 \omega \cdot d\omega, \\ N_{e\text{cp}} \cdot t_p &= \frac{J(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{2000}, \\ N_{e\text{cp}} &= \frac{J(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{2000 \cdot t_p}, \end{aligned}$$

где $N_{e\text{cp}}$ - средняя эффективная мощность на участке $\Delta\omega$.

Данная формула мощности применима к разгону на всех цилиндрах.

При поочередном разгоне с половиной выключенных цилиндров:

$$N_e = \frac{J(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{2000 \cdot t'_p} + \frac{J(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{2000 \cdot t''_p} + N_M = \frac{J(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{2000} \left(\frac{1}{t'_p} + \frac{1}{t''_p} \right) + N_M,$$

где N_e и N_M - значения мощности эффективной и механических потерь; t'_p, t''_p - продолжительность разгона на одной и другой половине работающих цилиндров.

При определении N_e на основе измерений ускорения следует учитывать деформацию рабочего цикла при разгоне. Как показали исследования, расхождения в мощностных показателях на основе тормозного определения и разгона тем больше, чем на большем числе цилиндров разгоняется двигатель.

Однако бестормозной метод применим и для расчёта объекта настоящего исследования - двигателя Д300. Поскольку двигатель является

одноцилиндровым, необходимость отключения цилиндров отпадает, следовательно, расчётные зависимости значительно упрощаются.

Анализ разгона двигателя

Сравним результаты расчёта мощностей бестормозным методом и по крутящему моменту при свободном разгоне двигателя от нуля до максимальных оборотов. Для этого внесём некоторые изменения в расчётную модель двигателя Д300:

а) Отключим генератор движения, обеспечивающий постоянство оборотов;

б) Зададим начальную частоту вращения вала 1000 градусов в секунду или 160 оборотов в минуту, которую обеспечивает пусковой механизм (M_Start или "Initial Angular Velocity");

в) Учтём деформацию индикаторной диаграммы при изменении частоты оборотов. Воспользуемся упрощённым методом. Возьмём из теплового расчёта значения максимальной газовой силы на каждом режиме. Отнесём их к значению P_Z на номинальном режиме. Получим кривую коэффициента изменения газовой силы в зависимости от оборотов (см. рис. 28).

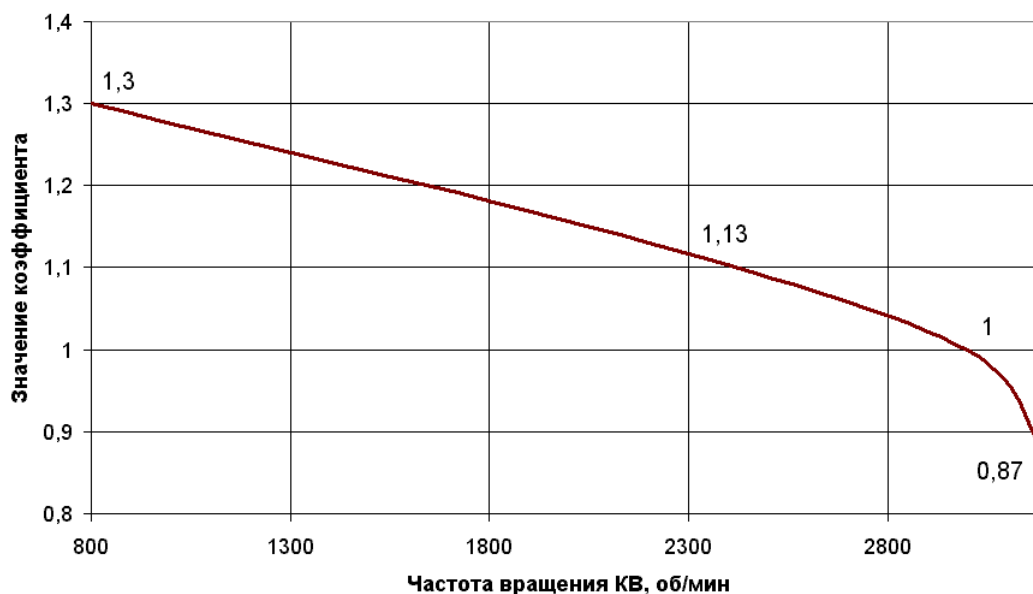


Рис. 28. Кривая коэффициентов изменения газовой силы

Аппроксимируем данную кривую прямой, проходящей через точку с координатами (3000;1). Уравнение прямой имеет вид:

$$K = -1,364 \cdot 10^{-4} \cdot n + 1,409.$$

Затем умножим эту функцию на функцию газовой силы в MSC.ADAMS. Функция газовой силы примет следующий вид:

```
CUBSPL(ROLL(mar_val_measure, Maxovik.cm)*180/PI,0,Gas_force_spline, 0)*(-0.0001364*((WX(mar_val_measure)/(2*PI))*60)+1.409)
```

Функция может иметь и другое значение, если известны значения газовой силы в переходных областях, полученные при нестационарном расчёте.

В результате получим следующие графики изменения газовой силы (рис. 29, 30):

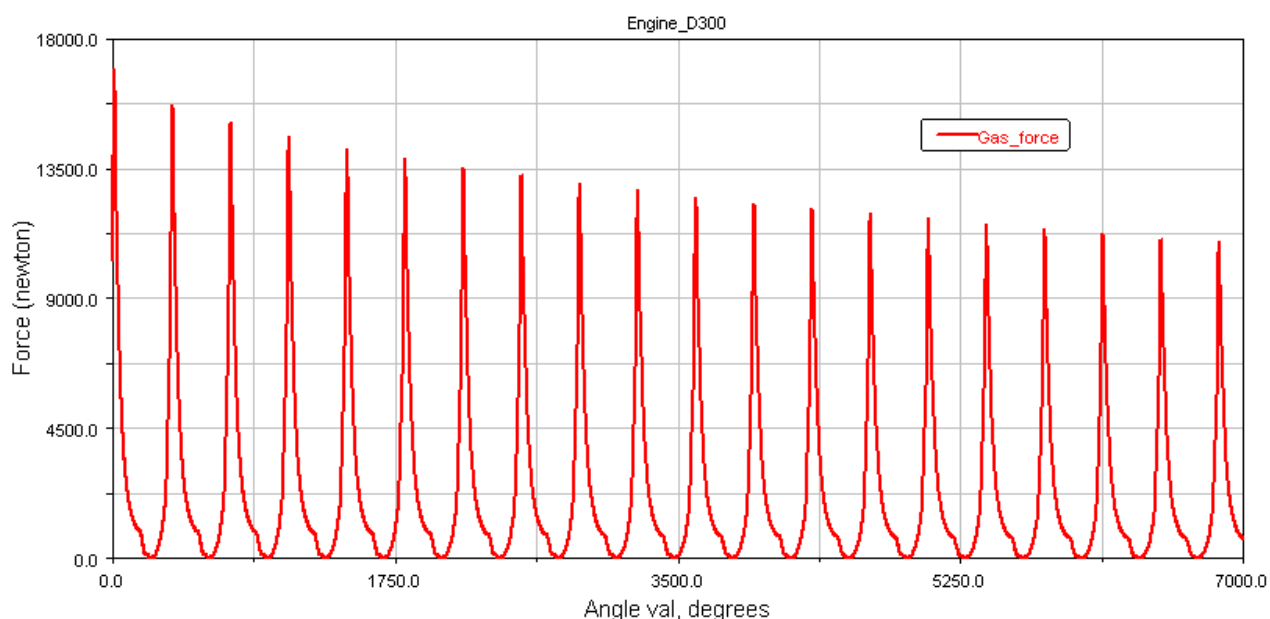


Рис. 29. График газовой силы в зависимости от угла поворота коленчатого вала

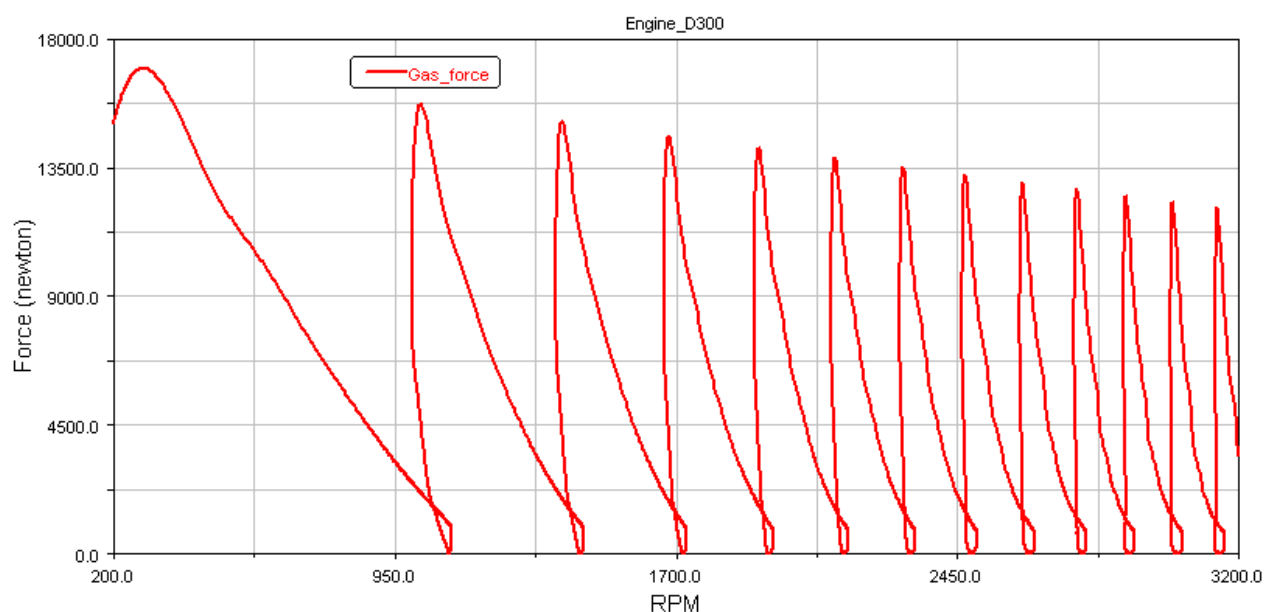


Рис. 30. График газовой силы в зависимости от частоты вращения коленчатого вала

г). Зададим момент механических потерь двигателя. Известно, что он изменяется примерно по следующей зависимости:

$$M_M = A \cdot n^2,$$

где $A = 3 \cdot 10^{-9}$ - константа механических потерь.

Приложим этот момент к коленчатому валу в сторону, противоположную крутящему моменту.

После задания исходных данных для получения более точных значений, расчёт производился с параметрами $time = 0,5$ с, $steps = 5000$. На рис. 31 приведен график ускорения поршня, наглядно показывающий процесс разгона двигателя Д300:

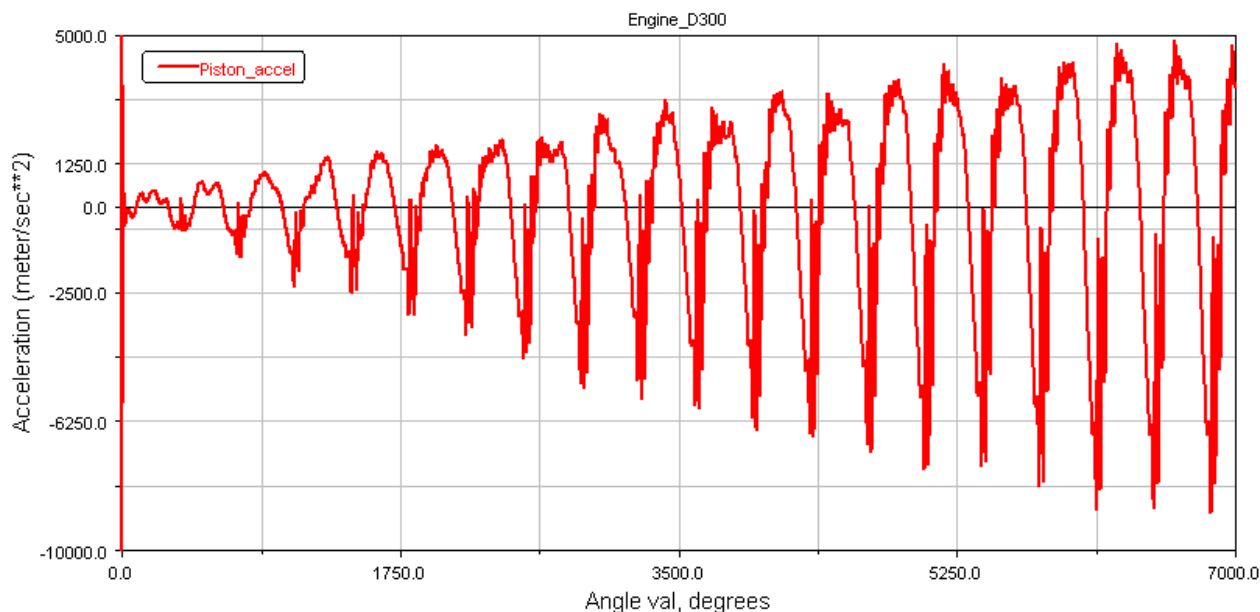


Рис. 31. График ускорения поршня в процессе разгона

На рис. 32 показано изменение момента сопротивления при разгоне двигателя. Он изменяется согласно приведенной выше формуле. Малая величина момента сопротивления объясняется тем, что потери на трение в подшипниках и поршневой группе уже учтены силами трения в составе самих узлов.

На рис. 33 показан график крутящего момента при разгоне. Поскольку величина газовой силы снижается с ростом частоты вращения из-за причин, указанных в тепловом расчете, то уменьшается и индикаторный крутящий момент двигателя.

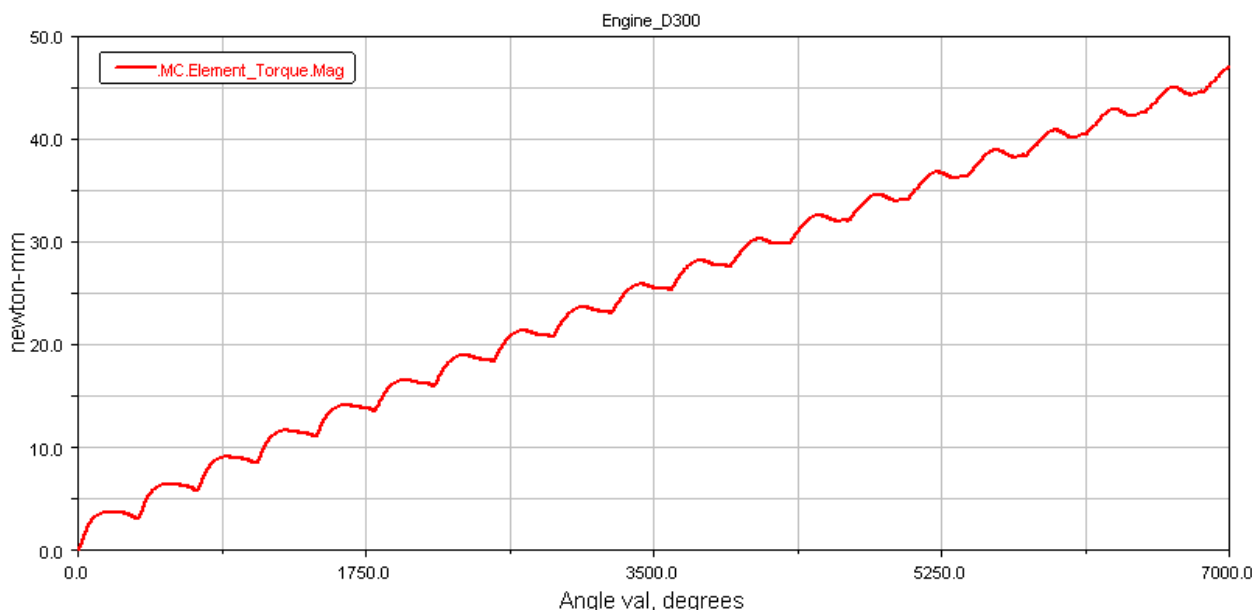


Рис. 32. График изменения момента механических потерь

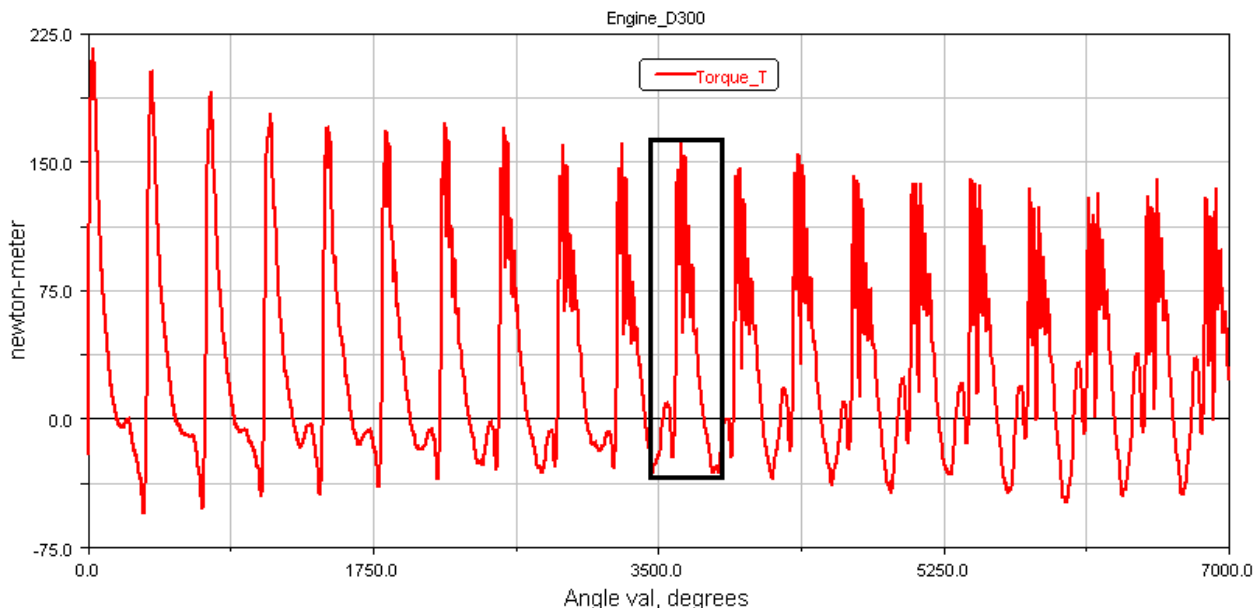


Рис.33. График изменения крутящего момента двигателя

В некоторых частях графики кажутся «смазанными». На самом деле, из-за большого времени расчета, графики получаются сильно «сжатыми» по оси абсцисс. Увеличение этих областей средствами ADAMS/PostProcessor позволяет увидеть дополнительные подробности. Так, на рис. 34 показан в увеличенном масштабе выделенный участок графика с рис. 33, на котором заметно, что плохо различимая часть образуется за счёт наложения колебаний более высокой частоты (по сравнению с частотой вращения коленчатого вала).

Однако мощность возрастает, поскольку падение крутящего момента компенсируется ростом частоты вращения коленчатого вала. На рис. 35 приводится сравнение мощности, вычисленной по крутящему моменту и мощности, полученной бестормозным методом. Из данного графика можно вычислить момент инерции двигателя Д300, он равен $J = 0,006435, \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

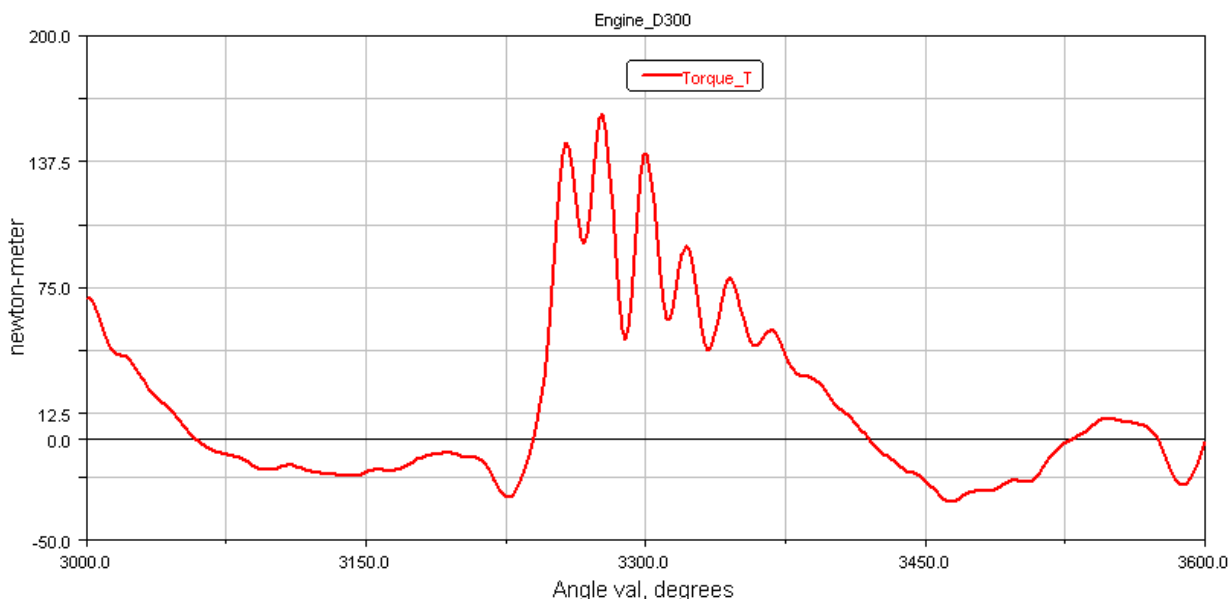


Рис. 34. Фрагмент графика крутящего момента

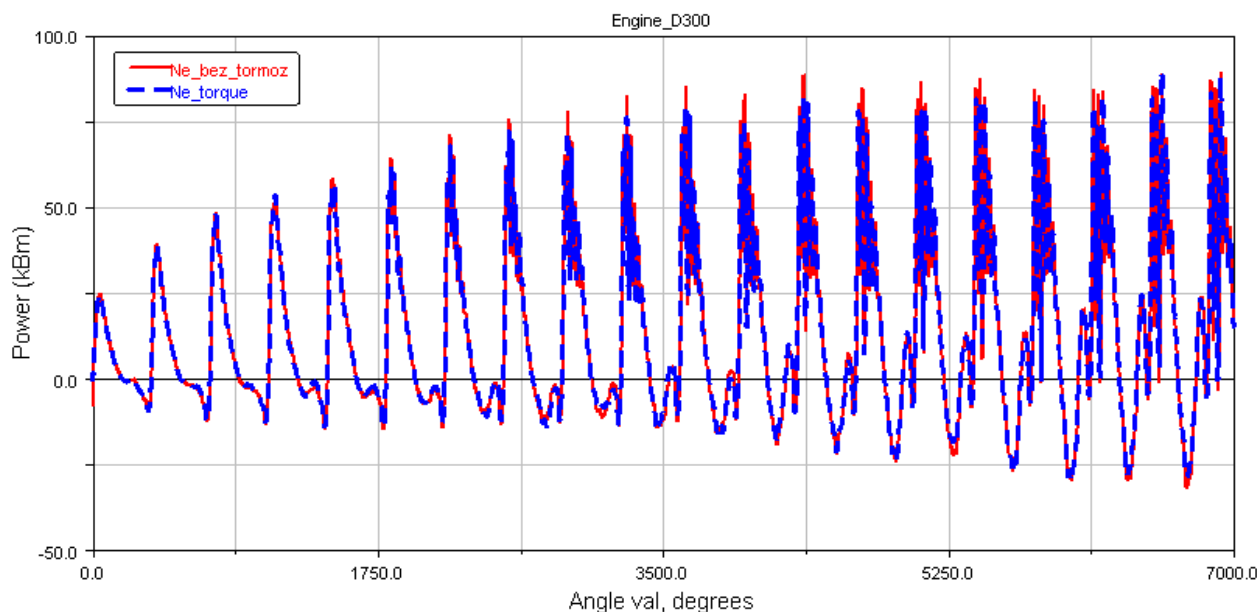


Рис. 35. График изменения мощности двигателя Д300 при разгоне:
Ne_bez_tormoz – мощность, полученная бестормозным методом;
Ne_torque – мощность, вычисленная по крутящему моменту.

Таким образом, результаты расчёта бестормозным методом, изложенным в данной работе, дают приемлемые результаты. Зная заранее момент инерции двигателя (либо вычислив его по известным зависимостям), можно применять этот метод к реальному двигателю.

В среде MSC.ADAMS, автоматически вычисляющей моменты инерции механизмов, бестормозной метод является более предпочтительным, так как освобождает от моделирования тормозных устройств.

Расчет двигателя с воздушным винтом

В предыдущих разделах был рассмотрен свободный разгон двигателя Д300, нагруженного только моментом механических потерь. Теперь выполним расчёт двигателя с потребителем. В качестве потребителя примем воздушный винт, поскольку закон изменения потребляемой мощности для этого устройства хорошо известен:

$$N_{\text{винта}} = B \cdot n^3,$$

где B – константа воздушного винта.

При условии задания в среде MSC.ADAMS законов работы других типов внешней нагрузки, например, электро- или гидротормоза, а также законов изменения индикаторной диаграммы, возможно снятие полного спектра основных характеристик двигателя.

В силу специфики применения двигателя Д300, возможно применение воздушного винта любого типа. Поэтому величина B :

$$B = \frac{N_{i_{\text{ном}}}}{n^3} = \frac{8,3945}{3000^3} = 3,1 \cdot 10^{-10}.$$

Поскольку MSC.ADAMS не позволяет напрямую приложить мощность в динамической модели, преобразуем ее в момент нагружения:

$$M_n = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot B \cdot n^2}{\pi} = 2,97 \cdot 10^{-6} \cdot n^2.$$

Произведем расчёт со следующими параметрами: $time = 1,5$ с, $steps = 3000$. Результаты расчёта приведены на следующих графиках (рис. 36...39):

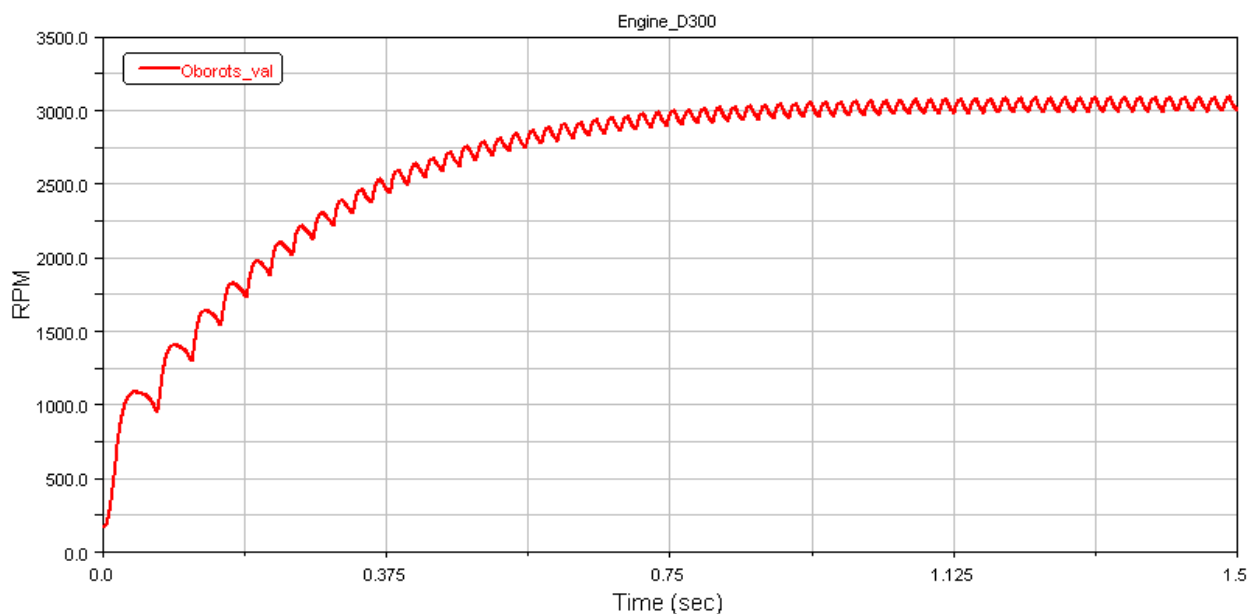


Рис. 36. График частоты вращения двигателя

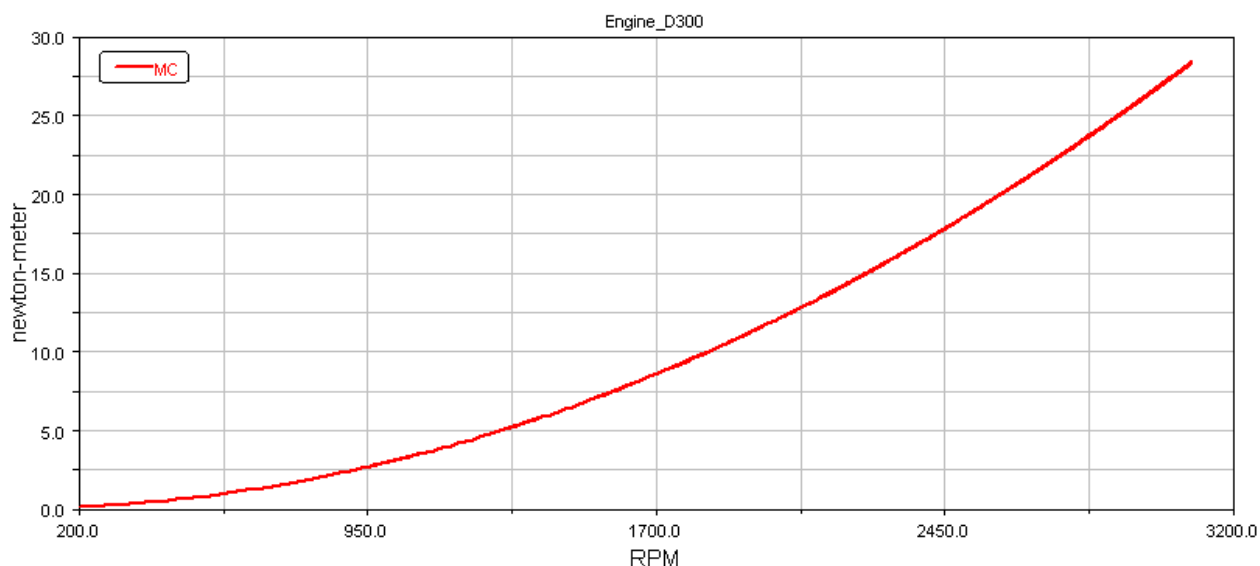


Рис. 37. График момента сопротивления

На рис. 36 хорошо заметно, что двигатель разгоняется до тех пор, пока мощность, необходимая на вращение воздушного винта не сравняется с мощностью двигателя. В данном примере винт подобран таким образом, чтобы это совпадение достигалось на номинальном режиме работы двигателя Д300.

Момент сопротивления (рис. 37) в данном случае представляет собой сумму момента механических потерь и момента, потребного на вращение винта. Однако, момент механических потерь столь мал (на три порядка меньше момента винта), что им можно в дальнейшем пренебречь. На рис. 38 показана зависимость крутящего момента двигателя от частоты вращения коленчатого вала в оборотах в минуту (RPM).

На рис. 39 показана зависимость мощности от частоты вращения коленчатого вала (RPM).

Сгущение линий в области графика, соответствующего 3000 об/мин говорит о достижении в этой точке равновесия двух мощностей, в силу чего дальнейшего роста оборотов не происходит.

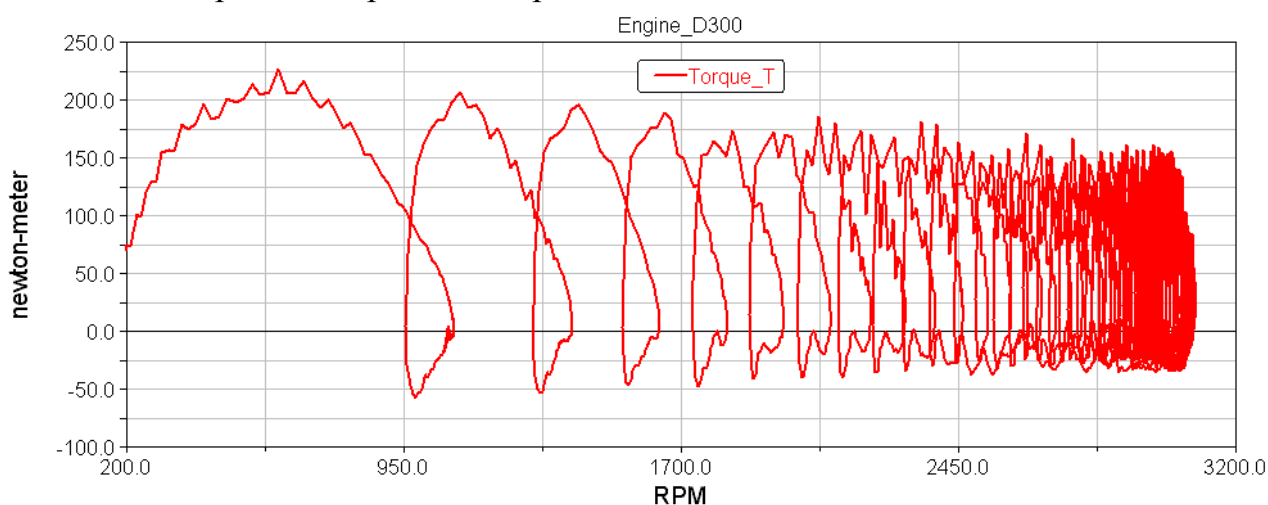


Рис. 38. График изменения крутящего момента

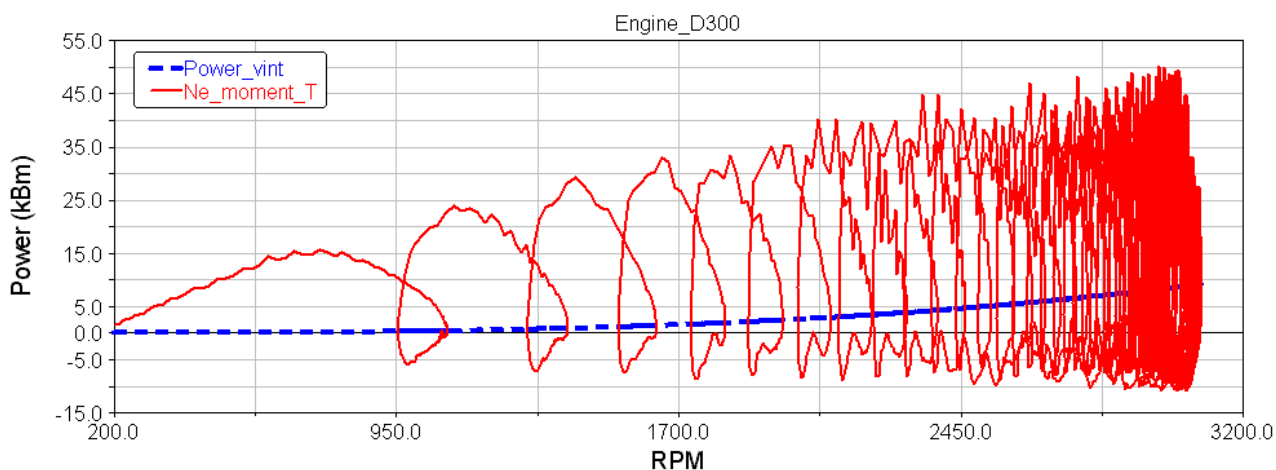


Рис. 39. Сравнение мощности двигателя и потребной мощности винта при условии равенства частоты оборотов (без редуктора):

Ne_moment_T — это мощность, вычисленная по крутящему моменту;

$Power_vint$ — это потребная мощность воздушного винта.

Представленные графики позволяют оптимизировать работу двигателя Д300 под конкретного потребителя с сохранением его наилучших эксплуатационных характеристик.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В ходе данной работы была изучена конструкция и работа механизма двигателя внутреннего сгорания Д300. Произведён его кинематический расчёт, получены и сравнены с экспериментом основные интегральные параметры: величины мощности и крутящего момента.

В процессе расчёта рассмотрено движение и определены кинематические параметры всех деталей. Проверены кинематические зазоры в конструкции.

Получены навыки создания кинематических групп на базе 3D-геометрии, приложения связей и ограничений, составления кинематической и динамической схем конструкции, приложения нагрузок, проведение расчёта движения модели и анализа результатов.

Данные числового и натурального экспериментов сопоставлены между собой с оценкой вычислительной погрешности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Гвоздев А. С.* Изучение конструкции авиационных двигателей и энергетических установок с совместным использованием пакетов ANSYS, ADAMS и SolidWorks : электрон. учеб. пособие / А. С. Гвоздев, В. С. Мелентьев. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2013. – Электрон. и граф. дан. (1,08 Мбайт). – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

2. *Гвоздев А. С.* Изучение конструкции авиационных двигателей и энергетических установок с использованием 3D-моделей их элементов : электрон. учеб. пособие / А. С. Гвоздев, В. С. Мелентьев, Д. С. Лёжин. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2013. – Электрон. и граф. дан. (12,7 Мбайт). – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

3. Двигатель карбюраторный Д300: Пособие по эксплуатации. – М. : Машиностроение, 1978. – 31 с.

4. *Каплун А. Б.* ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 272 с.

5. *Колчин А. И.* Расчет автомобильных и тракторных двигателей : учебное пособие для вузов / А. И. Колчин, В. П. Демидов. – М. : Высш. шк., 2002. – 496 с.: ил.

6. *Мелентьев В. С.* ADAMS/View, ADAMS/PostProcessor: краткий справочник пользователя: учеб. пособие / В. С. Мелентьев, А. С. Гвоздев. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосмического ун-та, 2006. – 106 с.: ил.

7. *Мелентьев В. С.* Лабораторный практикум по использованию MSC.ADAMS : электрон. метод. указания / В. С. Мелентьев, А. С. Гвоздев, Д. С. Лёжин. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2013. – Электрон. и граф. дан. (1 Мбайт). – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

ПРИЛОЖЕНИЕ.

Описание и характеристики двигателя Д300

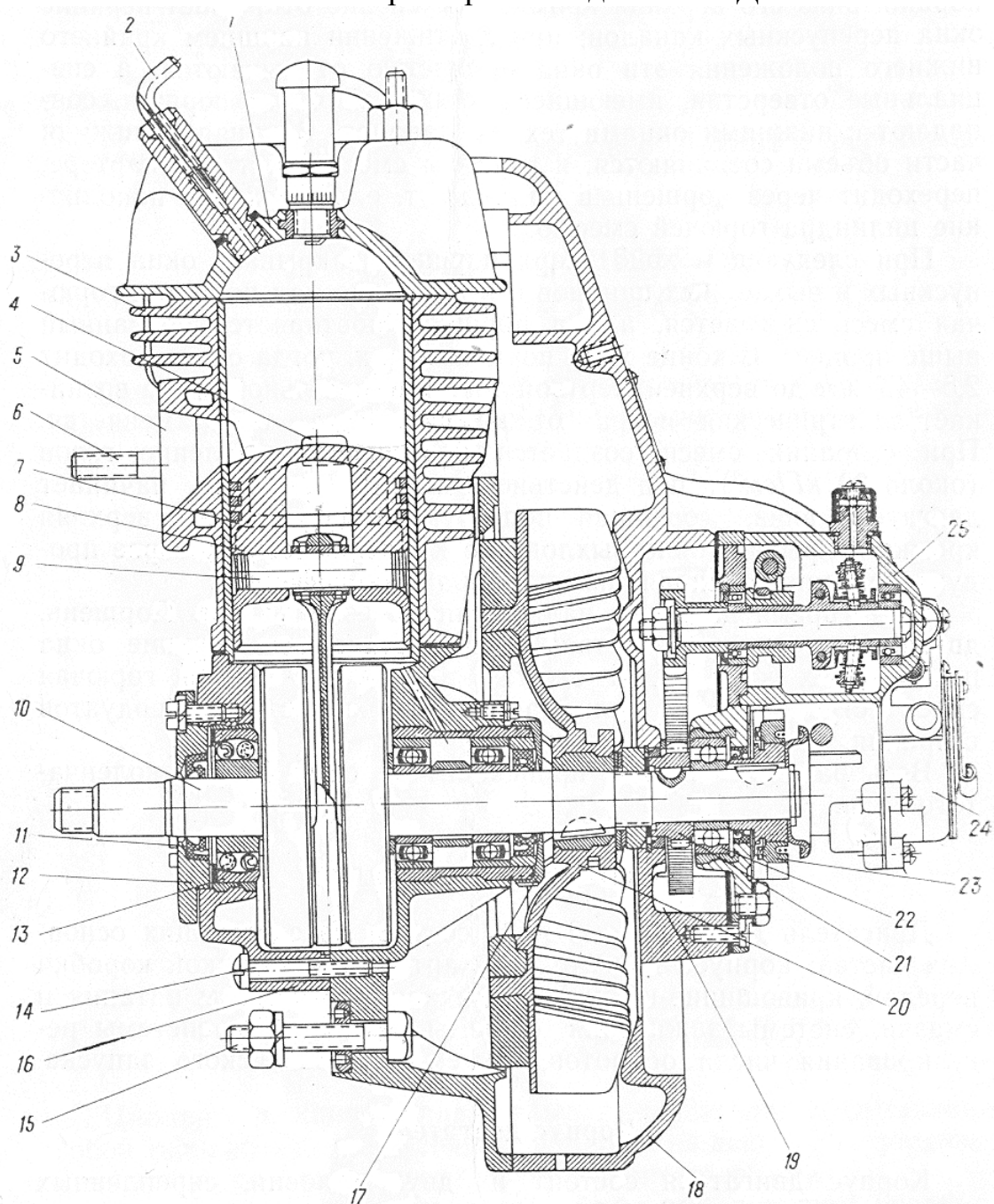


Рис. 1. Продольный разрез двигателя

1 — головка цилиндра; 2 — краник декомпрессионный; 3 — цилиндр; 4 — перепускной канал; 5 — выхлопной канал; 6 — шпилька крепления глушителя; 7 — поршень; 8 — стопорное кольцо; 9 — поршневой палец; 10 — коленчатый вал; 11 — резиновое уплотнение; 12 — крышка уплотнения; 13 — шариковый подшипник; 14 — винт картера; 15 — болт крепления двигателя; 16 — картер; 17 — гайка уплотнения; 18 — корпус двигателя; 19 — коробка передач; 20 — маховик-вентилятор; 21 — ведущая шестерня; 22 — вспомогательный подшипник; 23 — шестерня; 24 — магнето; 25 — регулятор

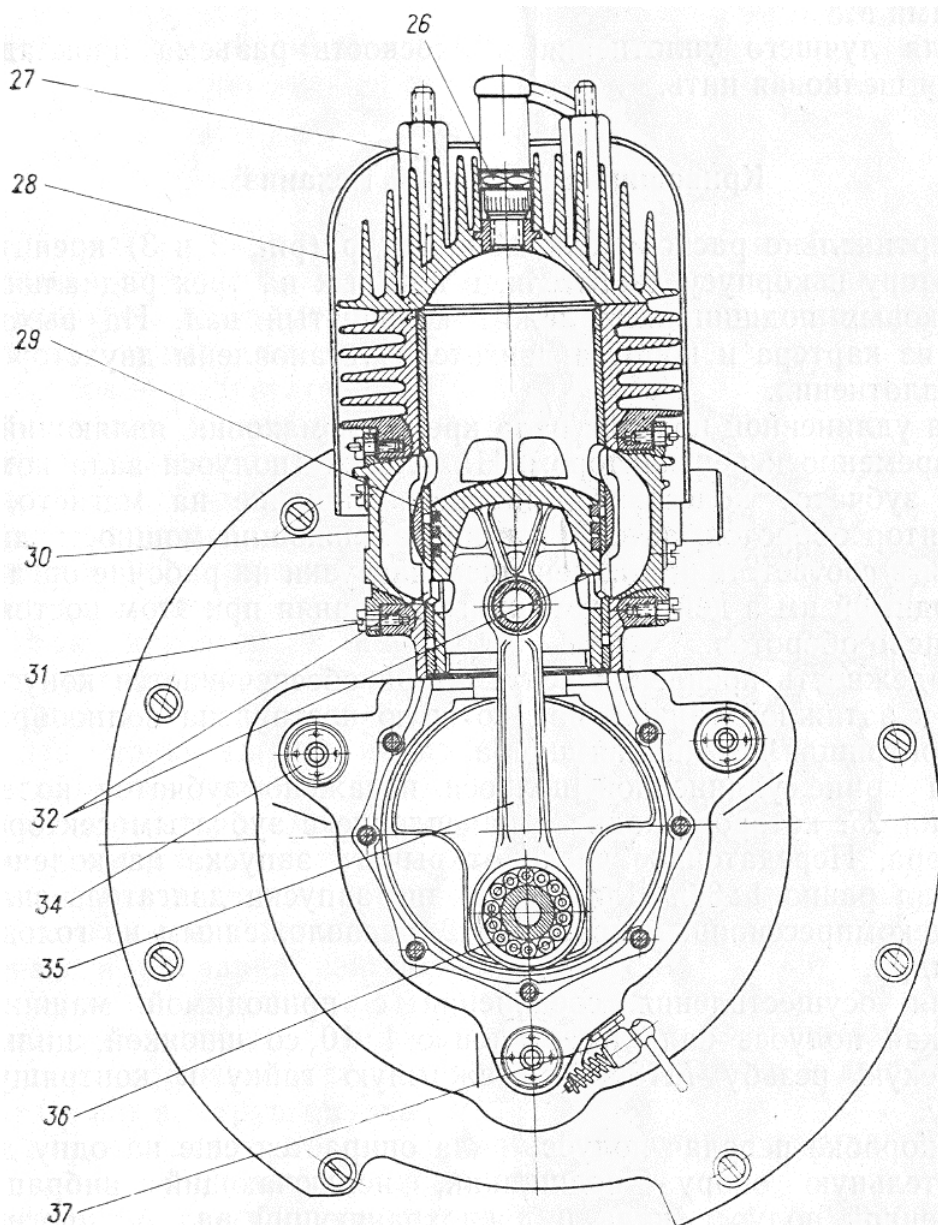


Рис. 2. Поперечный разрез двигателя

26 — свеча; 27 — болт; 28 — дефлектор; 29 — поршневое кольцо; 30 — заглушка перепускного канала; 31 — болт; 32 — перепускные каналы; 34 — гайка; 35 — шатун; 36 — ролик; 37 — краник спускной

Двигатель Д-300 работает по двухтактному циклу с двухканальной возвратной продувкой цилиндра горючей смесью (рис. 3).

Цилиндр и кривошипная камера двигателя представляют собой один объем, разделенный поршнем на две части: верхнюю и нижнюю, сообщающиеся перепускными каналами.

При движении поршня вверх объем под поршнем увеличивается и в кривошипной камере (картере) создается разрежение, под действием которого через всасывающий канал из карбюратора поступает смесь воздуха с бензином и маслом. Когда поршень находится в крайнем верхнем положении, объем под поршнем максимальный, всасывающий канал полностью открыт и через него происходит всасывание горючей смеси.

Характеристика двигателя

Мощность номинальная $N_{\text{н}}$, л. с.....	6,5 / 4,5
Мощность эксплуатационная, л. с.....	5 / 4
Число оборотов в минуту, n	3000/ 2200
Расход горючего, г э. л. с. час.....	380-400
Наибольший крутящий момент M_i (при n = 2200 об/мин), кгм.....	2,0
Число цилиндров, i	1
Диаметр цилиндра, мм.....	74
Ход поршня, мм.....	68
Рабочий объем цилиндра, см ³	293
Степень сжатия.....	$6,2 \pm 0,3$

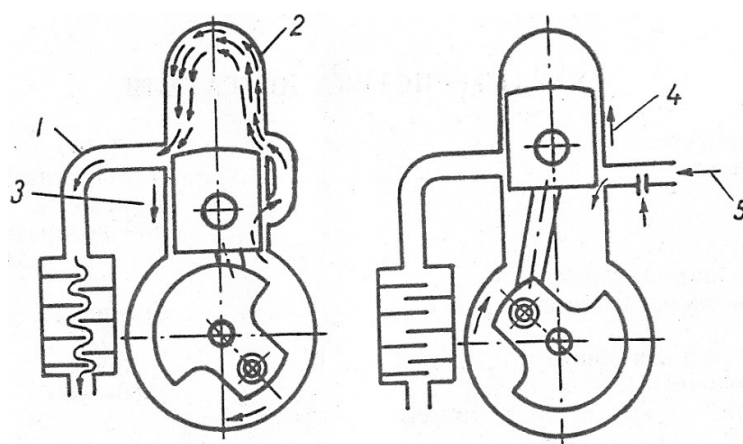


Рис. 3. Схема работы двигателя

1 — направление движения отработавших газов; 2 — направление движения рабочей смеси; 3 — направление движения поршня; 4 — направление движения поршня; 5 — всасывание воздуха

При движении поршня вниз объем под ним уменьшается, всасывающий канал постепенно закрывается и поступившая в картер горючая смесь сжимается. При дальнейшем движении поршня вниз его верхняя кромка постепенно открывает верхние окна перепускных каналов; при достижении поршнем крайнего нижнего положения эти окна полностью открываются, а специальные отверстия, имеющиеся в нижней части поршня, совпадают с нижними окнами тех же каналов. Верхняя и нижняя части объема соединяются, и горючая смесь, сжатая в картере, переходит через поршень в цилиндр, т. е. происходит наполнение цилиндра горючей смесью.

При следующем ходе вверх поршень закрывает окна перепускных и выхлопных каналов и в цилиндре над поршнем горючая смесь сжимается, а под поршнем повторяется описанный выше процесс. В конце хода поршня вверх, когда он не доходит 2,5—4,5 мм до верхней мертвой точки, в запальной свече возникает электрическая искра, от которой смесь воспламеняется. При сгорании смеси создается повышенное давление газов (около 30 кг/см²), под действием которых поршень начинает двигаться вниз, совершая полезную

работу, и его верхняя кромка открывает окно выхлопного клапана, через которое продукты сгорания выходят из цилиндра в атмосферу.

В это время давление над поршнем резко падает. Поршень, двигаясь к нижней мертвой точке, открывает верхние окна перепускных каналов, и сжатая в картере свежая горючая смесь устремляется в цилиндр, выталкивая остатки продуктов сгорания.

Весь рабочий процесс происходит за один оборот коленчатого вала.

Двигатель Д300 состоит из следующих основных частей: корпуса двигателя с картером и крышкой коробки передач, кривошипно-шатунного механизма, системы питания и смазки, системы зажигания, системы охлаждения, системы регулирования числа оборотов, системы механического запуска.

Корпус двигателя

Корпус двигателя состоит из двух половин, скрепленных восемью винтами М8. Обе половины центрируются кольцевым замком. Совместно с задней половиной корпуса двигателя отлита коробка передач, к которой плотно крепится винтами М6 крышка коробки передач.

В передней половине корпуса двигателя отлита одна из половин картера и три прилива, через которые пропущены болты М12 крепления двигателя к машине или к переходному постаменту.

Картер (передняя половина) соединяется с задней половиной корпуса двигателя кольцевым замком, центрирующим и уплотняющим плоскость, и крепится к корпусу двигателя семью винтами М8.

Для лучшего уплотнения в плоскость разъема прокладывается шелковая нить.

Кривошипно-шатунный механизм

Вертикально расположенный цилиндр крепится к картеру и корпусу двигателя, в которых на трех радиальных шариковых подшипниках лежит коленчатый вал. На выходе вала из картера и корпуса двигателя установлены двухсторонние уплотнения.

На удлиненной полуоси вала крепится маховик, являющийся одновременно и вентилятором. На этой же полуоси вала помещено зубчатое колесо, передающее вращение на магнето, и регулятор оборотов, автоматически изменяющий мощность двигателя в соответствии с изменением нагрузки на рабочие органы приводимой им в действие машины, сохраняя при этом постоянное число оборотов.

Надежность крепления вентилятора обеспечивается конусом 1:10 и затяжной гайкой, под которую поставлена волнообразная контрящая пружинная шайба.

На конце удлиненной полуоси посажено зубчатое колесо запуска 23, которое входит в зацепление с зубчатым сектором стартера. Передаточное число от рычага запуска на коленчатый вал равно 1:3,6. Для облегчения запуска двигатель снабжен декомпрессионным краником 2, расположенным на головке цилиндра.

Для осуществления соединения с приводимой машиной короткая полуось вала имеет конус 1:10 со шпонкой, цилиндрическую резьбу M18X1,5. зажимную гайку и конtringущую шайбу.

В коробке передач полуось вала опирается еще на одну дополнительную опору - подшипник, исключающий вибрации удлиненной полуоси вала и предохраняющий вал от прогиба под действием усилий, которые возникают при запуске.

Учебное издание

*Мелентьев Владимир Сергеевич,
Гвоздев Александр Сергеевич*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ ДВС ПРИ ИЗМЕНЕНИИ
РЕЖИМА РАБОТЫ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Подписано в печать 25.12.2017. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 3,25.

Тираж 25 экз. Заказ .

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА»
(Самарский университет)
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.