

УДК 621.431:004.9

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ, КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ «ВИРТУАЛЬНОГО ДВС»

© 2012 А. С. Гвоздев, В. С. Мелентьев

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Статья посвящена проблеме создания «виртуального двигателя внутреннего сгорания». На первом этапе расчета используется индикаторная диаграмма двигателя. Далее создаются объемная, а затем и конечно-элементная модели двигателя, учитывающие газодинамические процессы, происходящие в цилиндрах во время работы. Выполняются кинематический, динамический и прочностной анализы и ряд специализированных расчетов.

*Виртуальный ДВС, деформация, кинематический анализ, динамический анализ, прочностной анализ, трехмерная модель, конечно-элементная модель.*

В работе представлена методика создания "Виртуального ДВС", применяемая для проектирования на предприятиях двигателей внутреннего сгорания (ДВС) различных типов, разработанная и внедрённая в учебный процесс СГАУ.

Под "Виртуальным двигателем" [1] понимается комплекс, состоящий из объёмной модели двигателя и математического описания происходящих в нём процессов (рис. 1, 2). Концепция "виртуального двигателя" позволяет радикально уменьшить время и стоимость разработки двигателя. В процессе проектирования инструменты анализа имеют моментальную обратную связь с конструкцией.

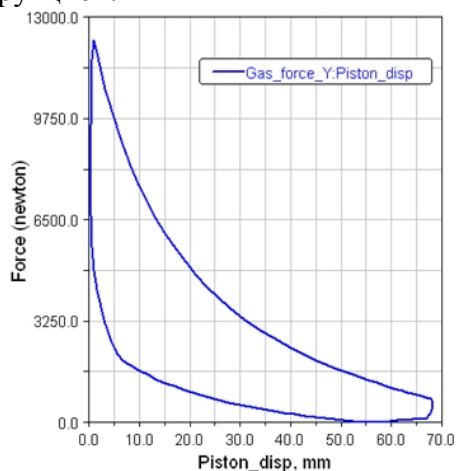


Рис. 1. Индикаторная диаграмма ДВС

Начальной точкой проектирования являются требуемые параметры рабочего цикла двигателя, реализованные в виде

индикаторной диаграммы (рис. 1), а также базовые граничные условия, определяемые техническим заданием или принятые на основе анализа прототипов.

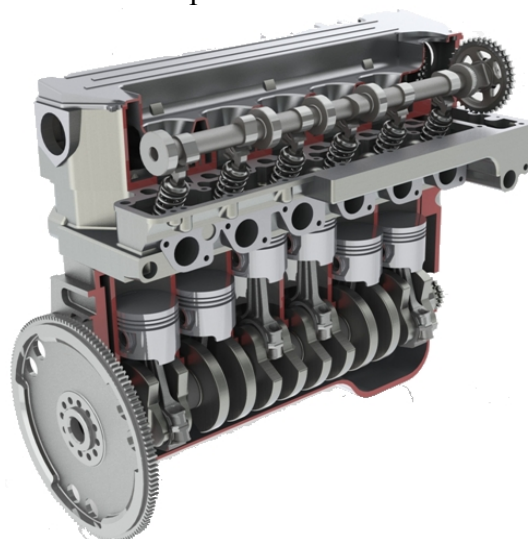


Рис. 2. Объёмная модель рядного четырёхтактного шестицилиндрового ДВС

Для реализации цикла создаётся параметрическая стержневая модель ДВС, позволяющая определить кинематические параметры характерных точек механизма при предполагаемых законах движения, выбрать размеры, и, при необходимости, откорректировать параметры цикла.

На следующем шаге проектирования создаётся объёмная модель ДВС (рис. 2, 4, 5). Суммарное время создания модели в пакете SolidWorks "с нуля" составляет около 200 часов. Из них на создание кривошипно-шатунного механизма (КШМ) – 12%,

газораспределительного механизма (ГРМ) – 5%, корпусных деталей – 72%; общую сборку – 5%. Остальное время тратится на мелкие детали и прочие операции (рис. 3).

Для каждого двигателя целесообразно строить модель КШМ и ГРМ на основе параметрических шаблонов, а корпусные детали брать в непараметризованном виде из пополняемой базы деталей ДВС проектной организации с последующей их доработкой в соответствии с техническим заданием. На завершающем этапе проектирования используется древовидная структура подборок и общий доступ к итоговой модели ("модульный" метод [2]).

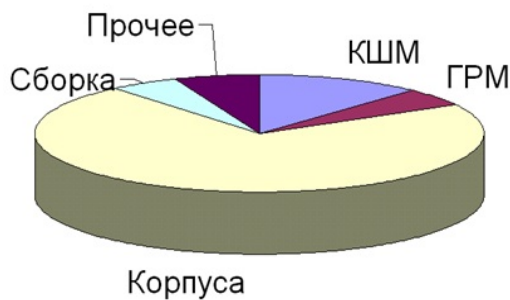


Рис. 3. Трудоемкость создания объемной модели

Одним из преимуществ "виртуального двигателя" является возможность без риска финансовых потерь экспериментировать с нетрадиционными конструкциями ДВС, которые могут обеспечить лучшие характеристики. Отметим возможность получения важной информации о характеристиках двигателя, которую крайне трудно получить экспериментальным путем. При этом метод имеет три основных ограничения: 1) возможности каждой расчетной среды (CAD, CAE (динамика, газодинамика прочность и т.д.), CAM) по скорости создания модели и глубине проработки; 2) степени интеграции (уровень потерь при обмене информацией между пакетами); 3) требуемой вычислительной мощности.

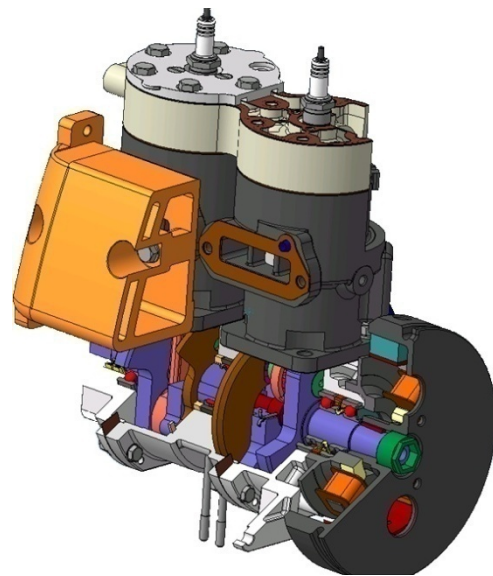


Рис. 4. Объемная модель рядного двухтактного двухцилиндрового ДВС

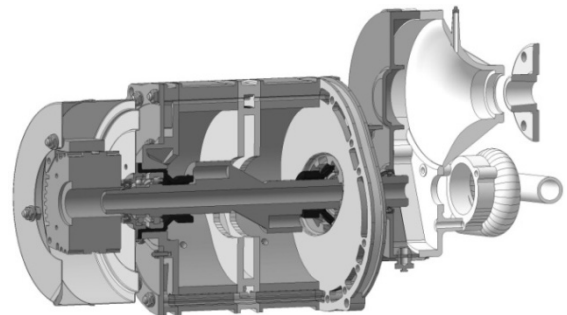


Рис. 5. Объемная модель роторно-поршневого ДВС

В связи с этим требуется оценка точности моделирования по трём критериям: 1) приемлемость допущений, сделанных во время математического моделирования физических явлений инструментами CAE. Не рассматривая основные ограничения, пользователь может ошибочно интерпретировать результаты расчёта; 2) граничные условия, которые определяют любую сложную модель. И даже небольшие несоответствия могут привести к явно неверным результатам; 3) влияние упрощений геометрии (плоская и объёмная постановки задачи) модели, которые должны оцениваться на этапе её подготовки.

На базе предложенной методики реализованы расчёты [3] рядного (рис. 2, 4), одноцилиндрового (рис. 6), V-образного (рис. 7, 8) и менее распространённых схем, например, роторно-поршневой (рис. 5).

Создание динамической модели [4] производится в пакете MSC.ADAMS и начинается с импорта геометрии и

назначения физических свойств деталей и кинематических связей между ними. Создаются "виртуальные датчики", измеряющие зависимости одних параметров модели от других и осуществляющие первичную математическую обработку. Задаются связи внешних сил (полученных из предварительных расчётов, на основании статистики или из результатов натурных испытаний упрощённых моделей) с параметрами механических систем, прикладываются газовые силы (в двухтактных и четырёхтактных поршневых двигателях различных схем в зависимости от угла поворота коленчатого вала, вала газораспределительного механизма, либо золотника с учётом изменения параметров рабочего тела (формы индикаторной диаграммы) на разных частотах вращения коленчатого вала двигателя), нелинейные жёсткость [5] и демпфирование для моделирования виброизолирующих опор двигателя, силы трения, а также контактные силы.

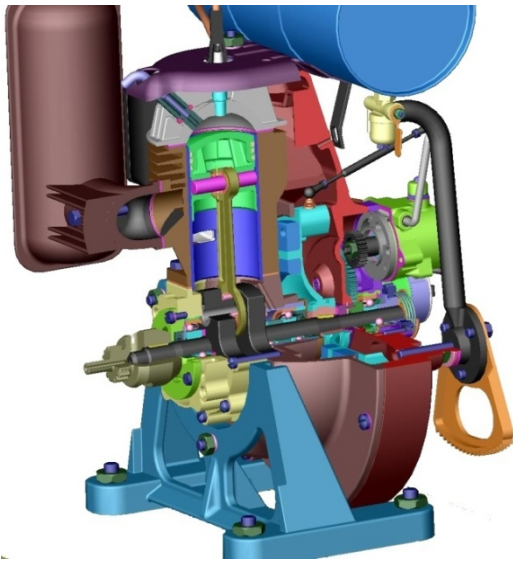


Рис. 6. Объёмная модель ДВС с агрегатами

Увеличение количества учитываемых в граничных условиях модели факторов требует более тесной интеграции различных инструментов, например, при расчёте тепловых нагрузок в поршне, где получаются коэффициенты нестационарной теплопередачи; или в блоке цилиндров, где учитывается движение потока охлаждающей жидкости.

При расчёте динамики с использованием метода Крейга-Бамптона

производится учёт деформации критичных деталей, таких как коленчатый вал [7] или клапана, позволяющий, например, получить переменные напряжения кривошипа, где действительные деформации коленчатого вала в рабочих условиях служат основой для анализа. Также можно упомянуть учёт в прочностной модели усилий в газораспределительном механизме, таких как силы, передающиеся через седла клапанов при посадке клапанов или результирующих усилий в подшипниках вала ГРМ; усилий от перекладки поршня, объясняющихся боковой силой, появляющейся из-за сложного движения поршня в цилиндре; неравномерности крутящего момента, снимаемого с коленчатого вала двигателя. При этом проверяются зазоры между деталями в процессе работы двигателя.

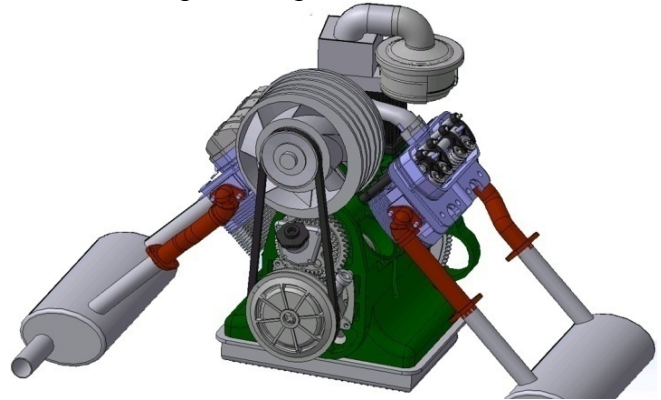


Рис. 7. Объёмная модель V-образного ДВС с агрегатами

Далее создаются модели агрегатов для компоновки (рис. 6, 7) и математические модели их входных и выходных функций для учёта в динамике работы системы. Обычно объёмная модель строится по номинальным размерам, а допуски и посадки обозначаются на программно связанных с ней чертежах. С целью удобства компоновки могут быть отдельно построены модели деталей по минимальным и максимальным значениям допусков. Для начальных расчётов наиболее распространённых типов двигателей в пакете MSC.ADAMS существуют параметрические модели с частично изменяемой геометрией (рис. 8).



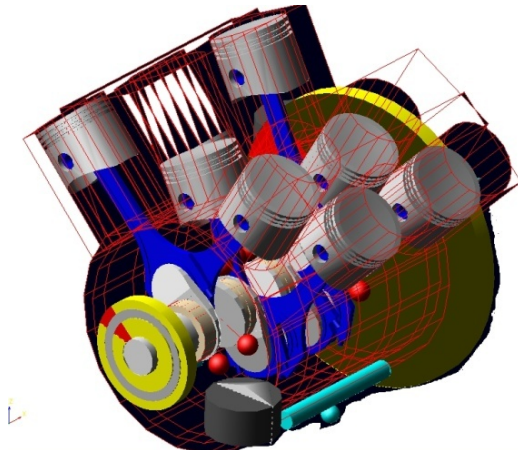


Рис. 8. Упрощённая параметрическая динамическая модель V-образного ДВС

Удобство их использования объясняется предустановленными шаблонами "виртуальных датчиков", в том числе и для косвенной оценки интегральных параметров двигателя, а также записанными алгоритмами расчёта для самых распространённых случаев анализа, таких как работа на постоянной частоте вращения, линейный разгон, тормозная характеристика.

Параллельно проводится исследование газодинамической модели процессов в цилиндрах ДВС с учётом горения (рис.9). При этом используются движущиеся сетки элементов для задания структуры потока. Движение сеток моделируется на основе динамической модели клапанного механизма (рис.10), где форма кулачков (либо кулачковой шайбы) в свою очередь вычисляется на основании требуемой диаграммы "время-сечение" через полученные в динамическом анализе законы движения звеньев механизма. Данный метод позволяет учесть нестационарные процессы в цилиндре и организовать плёночное (послойное) сгорание рабочей смеси.

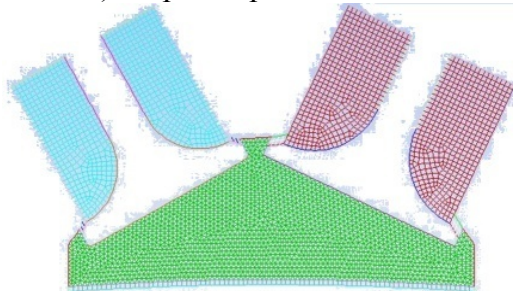


Рис. 9. Конечно-элементная модель газодинамических процессов в цилиндре ДВС с учётом горения

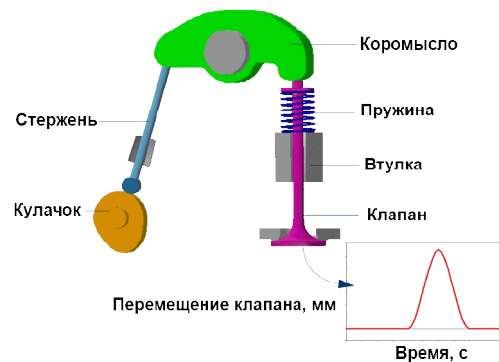


Рис. 10. Динамическая модель клапанного механизма

Если результаты удовлетворяют требованиям технического задания, то производятся уточнённые прочностные расчёты деталей (рис.11) и специализированные расчёты, такие как анализ вибрации основных (узлы подвески, валы [8] (рис. 12), подшипники) и вспомогательных (системы контроля и запуска, топливо - и маслоподающие магистрали) агрегатов (рис. 13).

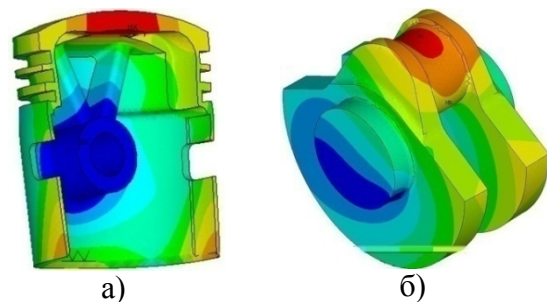


Рис.11. Расчёт на прочность отдельных элементов ДВС: а) поршень; б) расчёт колебаний коленчатого вала

В частности, модель подшипника формируется с помощью комбинации связей, когда наружное и внутреннее кольцо соединяются соответственно с корпусом и валом, внутреннему кольцу разрешается свободное вращение относительно сепаратора, а с внешним кольцом сепаратор соединяется упругой муфтой, позволяющей учесть податливость узла крепления. Соответствующие податливости, как для подшипников, так и для узлов подвески (могущих представлять собой, в том числе, и регулируемые виброзащитные устройства [6]) вычисляются при обработке данных конечно-элементного анализа в программном комплексе ANSYS.

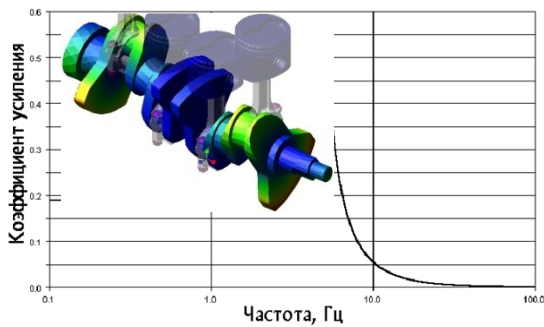


Рис. 12. Один из элементов расчёта коленчатого вала на крутильные колебания

Гидравлические цепи, совместно с системой управления интегрируемые в модель в виде функций, накладываются в качестве ещё одного уровня на модель и позволяют решать такие задачи, как определение требуемых усилий на органах управления или давлений в полостях, что, в свою очередь, является исходными данными для подробных расчётов этих агрегатов.

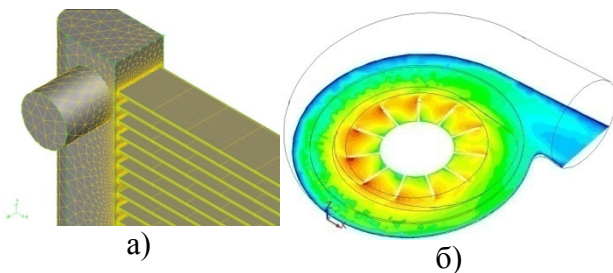


Рис. 13. Специальные расчёты: а) расчёт эффективности радиатора; б) газодинамический и прочностной расчёты турбокомпрессора

Наконец, на заключительном этапе "виртуальный двигатель" в виде набора характеристик, полученных в результате проведённых расчётов, и компоновочной объёмной модели интегрируется в модель транспортного средства для анализа влияния на различные системы, например, элементы подвески и рулевого управления (рис.14), или в силовой установке в качестве привода воздушного винта небольшого вертолёта [9]. Для передачи данных между пакетами при этом используются нейтральные форматы, а также специальные "коннекторы" (всё более распространяющиеся по мере стандартизации форматов и объединения разрозненных пакетов в среды проектирования), позволяющие одним пакетам генерировать данные,

расшифровывающиеся в качестве граничных условий в другой программной среде.

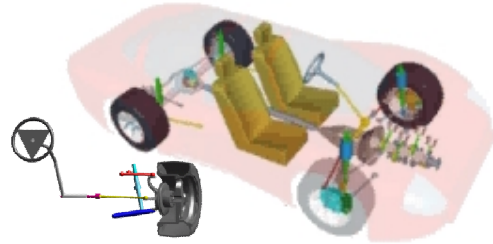


Рис. 14. Часть модели "виртуального автомобиля"

Данный подход, внедрённый в учебный процесс СГАУ, может позволить в сжатые сроки и с меньшими затратами создавать новые модели двигателей на предприятиях отечественного машиностроения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

### Библиографический список

1. Новый метод разработки двигателей - Концепция виртуального двигателя Ханс Петер Блаховский АВЛ ЛИСТ ГмбХ Ханс Лист Плац 1 А-8020 Грац, Австрия.
2. Мелентьев, В.С. Изучение конструкции двигателей с использованием 3D-моделей их элементов [Текст] / В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев, Д.С. Лежин. - Самара: Изд-во СГАУ, 2006.
3. Мелентьев, В.С. Проектирование конструкции "виртуального двигателя" [Элек.] / В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев, Ф.В. Паровой. ЦНИТ СГАУ, 2011.
4. Гвоздев, А.С. Изучение конструкции авиационного ДВС с использованием пакетов ANSYS, ADAMS, SolidEdge /А.С. Гвоздев, В.С. Мелентьев. - Самара: Изд-во Самарского государственного аэрокосмического ун-та, 2006 г.
5. Пономарев, Ю.К. Инженерная методика расчета статических характеристик виброизоляторов с прямолинейными и кольцевыми рабочими участками в нелинейной постановке [Текст] / Ю.К. Пономарев, А.М. Уланов, В.С. Мелентьев и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Спец. выпуск

- «Актуальные проблемы машиностроения». – 2009.
6. Гвоздев, А.С. О возможности управления характеристиками многослойных виброизоляторов с конструкционным демпфированием [Текст] / А.С. Гвоздев, В.С. Мелентьев, Ю.К. Пономарев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. Т. 11 (31), №5.
7. Мелентьев, В.С. Методика автоматизированного расчета КШМ и поршневой группы с учетом податливости коленчатого вала /В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев // VIII Королевские чтения, 2005 г.
8. Ржевский, В.П. Исследование крутильных колебаний роторов [Текст] / В.П. Ржевский, Ф.В. Паровой, Д.С. Лежин [и др.]. - Самара: Изд-во СГАУ, 2006.
9. Мелентьев, В.С. Проектирование системы стабилизации лопастей вертолета с совместным использованием CAD/CAE пакетов /В.С. Мелентьев, А.С. Гвоздев // Всероссийская научно-техническая Интернет-конференция «Компьютерные технологии в машиностроении», 2007.

## SIMULATION DESIGN, KINEMATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF "VIRTUAL PISTON ENGINE"

© 2012 A. S. Gvozdev, V. S. Melentjev

Samara State Aerospace University  
named after academician S.P. Korolyov (National Research University)

In this paper, the technique of creating a "virtual engine". The first step is the calculation of the indicator diagram is used. How to create three-dimensional model and its analysis is performed shall be considered a finite-element model of the gas-dynamic processes in the cylinder combustion engine based, kinematic, dynamic and strength calculations, as well as specialized calculations.

*Virtual engine, deformation, kinematic analysis, dynamic analysis, strength analysis, three-dimensional model, finite-element model.*

### Информация об авторах

**Гвоздев Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [xandr\\_mail@mail.ru](mailto:xandr_mail@mail.ru). Область научных интересов: вибрационная защита технических объектов, кинематика и динамика механических систем.

**Мелентьев Владимир Сергеевич**, Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [vladamgenja@mail.ru](mailto:vladamgenja@mail.ru). Область научных интересов: вибрационная защита технических объектов, кинематика и динамика механических систем.

**Gvozdev Aleksandr Sergeevich**, Ph.D., Associate Professor. Chair of design and production aircraft engine, Samara State Aerospace University. E-mail: [xandr\\_mail@mail.ru](mailto:xandr_mail@mail.ru). Area of research: Vibration- and shock-protection systems for the aeronautical facilities and general engineering, Kinematic, dynamic and strength analysis of mechanical systems.

**Melentjev Vladimir Sergeevich**, Ph.D., Associate Professor. Chair of design and production aircraft engine, Samara State Aerospace University. E-mail: [vladamgenja@mail.ru](mailto:vladamgenja@mail.ru). Area of research: Vibration- and shock-protection systems for the aeronautical facilities and general engineering, Kinematic, dynamic and strength analysis of mechanical systems.