

УНИФИЦИРОВАННЫЕ РАЗНОУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОПЕРЕЖАЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

М.В. Амброжевич, аспирант,

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков, Украина

Постановка проблемы и её связь с научно-практическими задачами. В области критических технологий отчетливо прослеживается тенденция к удорожанию этапов работ, связанных с натурным экспериментом и доводкой экспериментальных и опытных образцов. Для разработчика фатальный характер стоимостных ограничений приобретает лапидарную формулировку «без права на ошибку». Фактически это означает неизбежность перенесения центра тяжести НИР (НИОКР) с конечных стадий доводки опытного образца на начальные (этапы технического предложения, эскизного проекта), когда только формируется облик объекта. Бурное развитие информационных технологий радикальным образом изменило роль численного моделирования, неуклонно вытесняющего традиционные методы исследований и проектирования. Однако до сих пор геометрическое моделирование (ГМ) в системах плоского и твердотельного проектирования и исследование рабочего процесса численным экспериментом (ЧЭ) сосуществуют в параллельных плоскостях без непосредственного взаимодействия, и синтезированный практический результат получается лишь как продукт последующей интеллектуальной переработки. Таким образом, востребован принципиально новый инструментарий ранних стадий НИР (НИОКР) на основе передовых информационных технологий, объединяющий ГМ и ЧЭ и создающий виртуальный образ моделируемого объекта.

Обратимся теперь к «моделируемому объекту». Одним из наиболее перспективных направлений в области критических технологий является создание дистанционно управляемых авиационных систем (ДУАС). В связи с устойчивой тенденцией к миниатюризации и удешевлению полезной нагрузки практически осваивается диапазон беспилотных летатель-

ных аппаратов (БЛА) с полетной массой менее 20 кг. Однако уровень совершенства двигательных установок (ДУ) мини-БЛА на данном этапе совершенно не отвечает бурному прогрессу средств электроники и оптики. В данном классе практически безраздельно господствуют винтомоторные силовые установки с поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ПДВС), спроектированными на основе авиамодельной идеологии 1950-1960 гг. Возникает необходимость малозатратной, комплексной экспертизы ДУ с ПДВС традиционных и перспективных схем, базирующейся на моделировании термогазодинамических процессов во всей проточной части ДУ.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. Несмотря на значительный прогресс в области аппаратно - программного обеспечения, использование пространственных моделей газообмена, детально воспроизводящих кинетику химических реакций, геометрию проточной части и теплообмен, по-прежнему несовместимо с возможностями современных ЭВМ. Сказывается также существующая коммерческая монокультурность в развитии информационных технологий. Специализированная вычислительная техника и соответствующее программное обеспечение развиваются менее динамично и малодоступны вследствие непомерно высокой цены. Таким образом, практически востребованной остается лишь незначительная часть достижений математической физики, теории турбулентности, химической термодинамики и др. областей, определяющих содержание математических моделей процессов в ПДВС, использование которых позволило бы создать полноценный виртуальный аналог моделируемого объекта. Успешное решение поставленной задачи имеет в своей основе компромиссное устранение антагонизма между содержательностью моделей и

возможностями располагаемой вычислительной техники. Комплекс современных мультимедийных средств, обеспечивающих синхронное сопровождение ЧЭ (анимация, твердотельная графика), в свою очередь, позволяет создать виртуальную модель объекта.

Цель исследований. Необходимая полнота представлений о рабочем процессе в ПДВС может быть получена только на базе целостной нестационарной модели, учитывающей взаимное влияние основных узлов. Первичным и, следовательно, доминирующим в модели такого рода должен быть газодинамический процесс. В качестве обратной связи модель должна отражать кинематику и динамику оригинала. Таким образом, в соответствии с общепринятой классификацией [1] речь идет о регулярной, детерминированной комплексно-сопряженной модели. С учетом интенсивности процессов газообмена такая модель должна быть нелинейной, а для ее реализации потребуются численные методы.

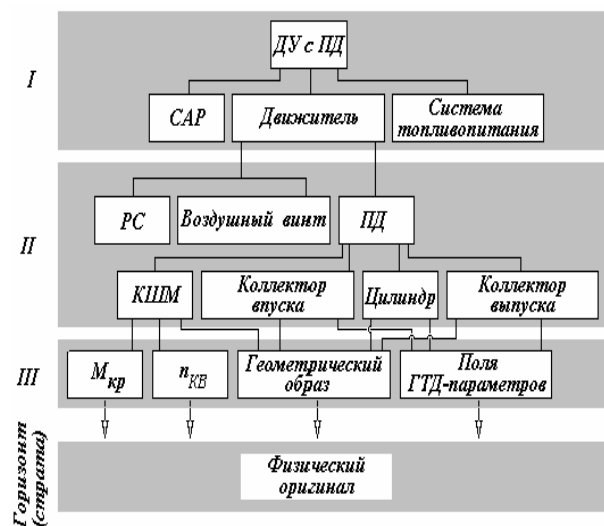


Рис. 1. Иерархическое описание модели ДУ с ПДВС:

САР – система автоматического регулирования,
КШМ – кривошипно-шатунный механизм,
РС – резонансное сопло,
ГТД – «газотермодинамические»

Модульный принцип построения моделей ДУ с ПДВС в соответствии с общей теорией многоуровневых систем [2] и по аналогии с известными иерархическими описаниями ДУ ЛА [1] сводится к структурной схеме, представленной на рис. 1.

Объединяющим началом семейства разноуровневых (нуль-, одно- и трёхмерных – по необходимости) моделей узлов ПДВС является *метод особенностей*,

позволяющий получить унифицированное и линеаризованное на шаге временной сетки отображение матрицы доминирующих факторов физического оригинала, чем обеспечивается необходимая экономичность триады ЧЭ «физико-математическая модель (ФММ) → численный метод → программная реализация» [3]. В основе ФММ процессов лежат фундаментальные физические законы. Адекватность используемых физических допущений, применяемые методы численной реализации, соответствующие алгоритмы, а также основные структурные решения верифицированы по результатам натурных исследований рабочего процесса в двухтактном авиационном ПДВС с кривошипно-камерной продувкой [4]. Программное обеспечение ЧЭ прошло проверку комплексным тестированием.

Результаты исследований. В качестве примера использования разработанной технологии численного моделирования можно привести результаты опережающих исследований рабочего процесса в ДУ с двухконтурным мотокомпрессорным воздушно-реактивным двигателем малых тяг (МКВРД МТ) [5, 6] (рис. 2, 3; табл. 1, 2).

Газогенератор МКВРД МТ выполнен в виде органической спарки двух блоков свободно-поршневых генераторов газа с КШМ синхронизации. В табл. 2, 3 используются следующие сокращения: РЦ – рабочий цилиндр, КЦ – компрессорный цилиндр, ВПП – внутрипоршневая полость, ЭПИ – эжекторный преобразователь импульса, ВК – впускной коллектор.

Для визуализации результатов ЧЭ, имеющей принципиальное значение в задачах гидромеханики [7], разработана анимационная оболочка, обеспечивающая синхронное сопровождение ЧЭ. Данная оболочка использует стандартный набор графических средств VISUAL FORTRAN и имеет высокую степень унификации с аналогом для модели ПДВС [4]. Для координатной привязки фазовых срезов континуума состояний модели МКВРД МТ (рис. 2, 3) используется индикатор угла поворота КШМ в левом верхнем углу.

В основном левом поле размещены термодинамические (p-V) и расходные (G_k -V, $k=1, \dots, 4$) индикаторные диаграммы всех рабочих полостей двигателя.

Нестационарные 1D-процессы в ВК, выпускных

патрубках и выпускном коллекторе с реактивной насадкой представлены в форме графиков распределения параметров по длине соответствующих каналов и цветowych карт. Важнейшие интегральные показатели

МКВРД МТ, включая высотно-скоростные характеристики, представлены в статье [6].

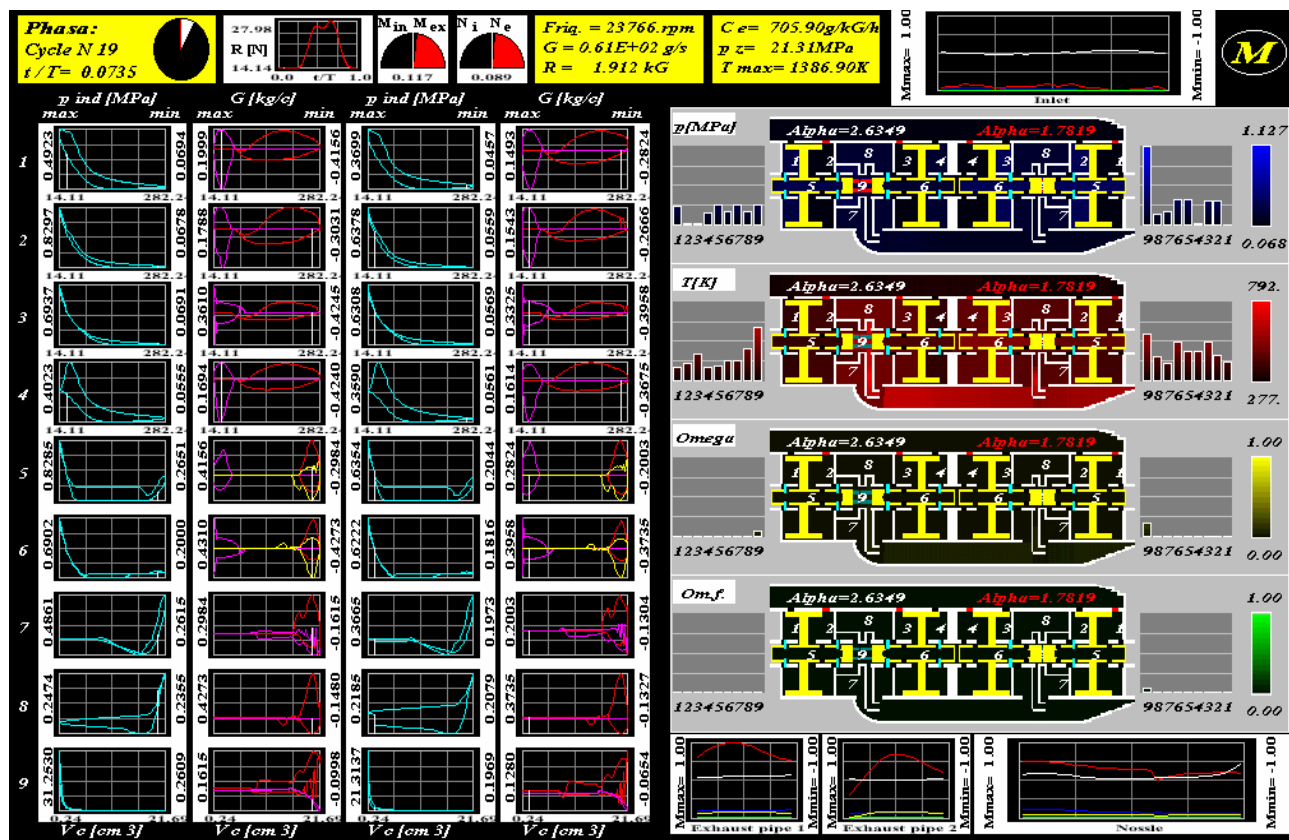


Рис. 2. Состояние в МКВРД в момент воспламенения в цилиндре 2-го блока

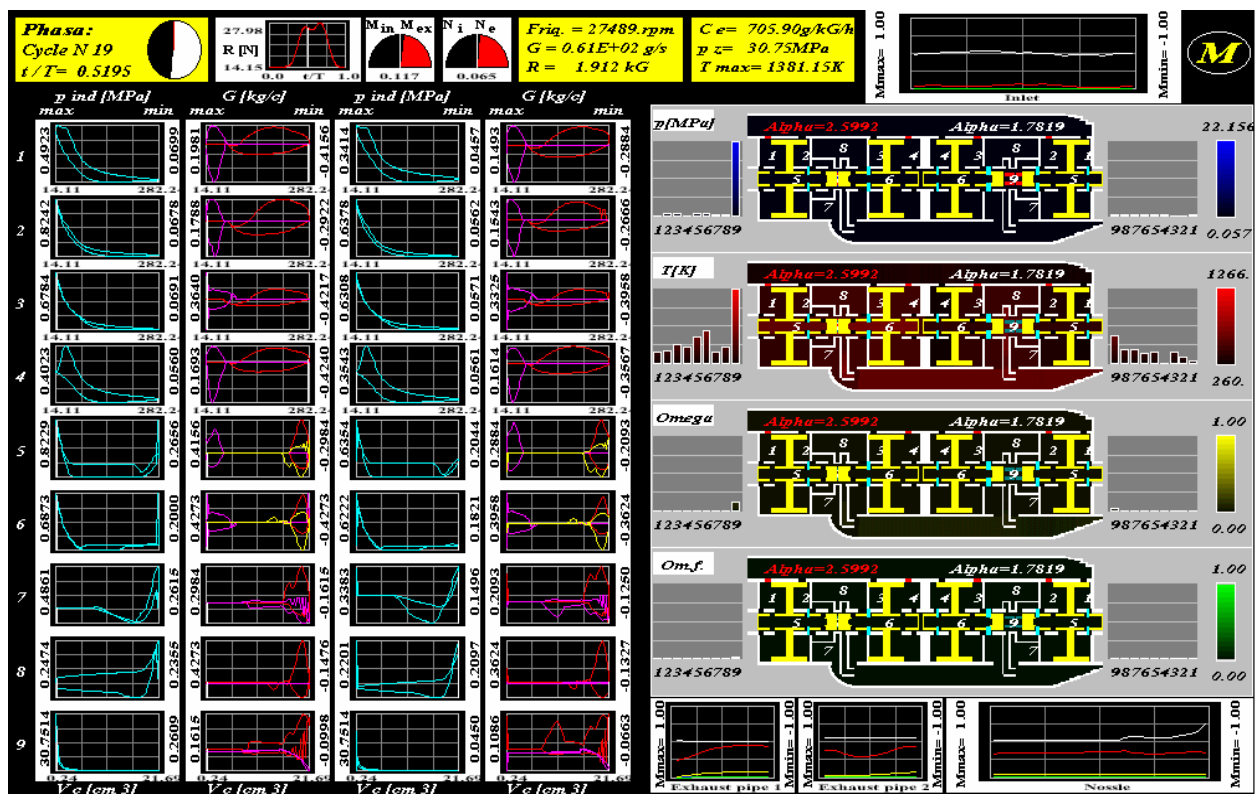


Рис. 3. Состояние в МКВРД в момент воспламенения в цилиндре 1-го блока

Таблица 1

Фазовые срезы. Комментарий рис.2

Узлы и функции		Фазы процессов	
Впускной коллектор		Срабатывание клапанов практически не влияет на поле параметров	
Резонатор - сопло		Начало перемещения волны сжатия от ЭПИ I; уровень температур ниже, чем в выпускном	
Тяга		Минимальная	
Баланс ГД сил между внеш. и внутр. подв. агр.		+ 8,9 %	
Частота вращения КШМ		Растет	
Блок		I	II
КЦ № 1	Вп. окна	Закрыты	Открыты, вып. клапан, всасывание воздуха из ВК - разрежение
	Вып. окна	Открыты частично	Закрыты
	Состояние	Начало расширения, давление $\geq 0,24$ МПа	Всасывание воздуха из ВК, разрежение
КЦ № 2	Вп. окна	Открыты	Закрыты
	Вып. окна	Закрыты	Открываются
	Состояние	Всасывание воздуха из ВК, разрежение $\approx 0,6$ МПа	Нагнетание продувочного воздуха, уровень давлений $\geq 0,24$ МПа
КЦ № 3	Вп. окна	Открыты	Закрыты
	Вып. окна	Закрыты	Открыты частично
	Состояние	Всасывание воздуха из ВК - разрежение	Начало расширения, давление $\geq 0,30$ МПа
КЦ № 4	Вп. окна	Закрыты	Открыты,
	Вып. окна	Открыты частично	Закрыты
	Состояние	Начало расшир., давление $\geq 0,24$ МПа	Всасывание, объем уменьшается
ВПП № 5		Сообщается с КЦ № 1 (окно закрывается) и продувочной полостью № 7	Нагнетание из КЦ № 2
ВПП № 6		Сообщается с КЦ № 4 (окно закрывается) и ресивером № 8	Нагнетание из КЦ № 3
Продувочный канал № 7		Сообщается с ВПП № 5 – фаза нагнетания	Разобщен с ВПП № 5 и РЦ № 9
Ресивер № 8		Поддерживается примерно постоянный уровень давлений $0,23 \pm 0,24$ МПа	Поддерживается примерно постоянный уровень давлений $0,21$ МПа
РЦ № 9	Продув. окна	Открыты	Закрыты
	Вып. окна	Открыты	Закрыты
	Горение	-	$\alpha = 1,76$, концентр. п.с. $\approx 0,18$
	Состояние	Продувка	Начало рабочего хода
Выпускной патрубок № 10		Идет выпуск, высокотемпературная зона движется с низкими скоростями	Заполнен малоподвижным высокотемпературным столбом газа

патрубках и выпускном коллекторе с реактивной насадкой представлены в форме графиков распределения параметров по длине соответствующих каналов и цветовых карт. Важнейшие интегральные показатели МКВРД МТ, включая высотно-скоростные характеристики, представлены в статье [6].

Выводы и перспективы дальнейших исследований.

Идея создания виртуальных моделей технических объектов витает в воздухе, но, как известно, между самой идеей и её воплощением лежит пропасть. Концепция модульного принципа построения модели объекта, когда разноуровневые подмодели ТГД про-

цессов в узлах ДУ унифицированы благодаря методу особенностей, позволяющему единообразно представлять факторы различной физической природы с последующим применением единых ЧМ (на основе схемы Годунова расщепления по физическим процессам) и графических примитивов, представляется оптимальной с позиций как адекватности модели оригиналу, так и экономичности ЧЭ, что делает реальным виртуальное моделирование двигателей различных схем.

Фазовые срезы. Комментарий рис.3

Узлы и функции		Фазы процессов	
Впускной коллектор		Почти неподвижное поле параметров, несмотря на открытые окна КЦ	
Резонатор - сопло		Обусловленное фазой выпуска из РЦ № 9 блока II движение заметно от ЭПИ II до среза РС, ср. температура $\approx 600\text{K}$	
Тяга		Близка к максимальной	
Баланс ГД сил между внеш. и внутр. подв. агр.		+ 6,5 %	
Частота вращения КШМ		Нарастает	
Блок		I	II
КЦ № 1	Вп. окна	Открыты	Закрыты
	Вып. окна	Закрыты	Открыты
	Состояние	Заполнение при уменьшении объема, 0,057 МПа	Нагнетание в ВПП № 5, $\approx 0,34$ МПа
КЦ № 2	Вп. окна	Закрыты	Открыты
	Вып. окна	Открыты	Закрыты
	Состояние	Нагнетание в ВПП № 5, $\approx 0,82$ МПа	Заполнение при уменьшении объема, 0,057 МПа
КЦ № 3	Вп. окна	Закрыты	Открыты
	Вып. окна	Открыты	Закрыты
	Состояние	Нагнетание в ВПП № 5, $\approx 0,82$ МПа	Заполнение при уменьшении объема, 0,057 МПа
КЦ № 4	Вп. окна	Открыты	Закрыты
	Вып. окна	Закрыты	Открыты
	Состояние	Заполнение при уменьшении объема, $\approx 0,057$ МПа	Нагнетание в ВПП № 6, $\approx 0,35$ МПа
ВПП № 5		Нагнетание из КЦ № 2 при малых градиентах давлений, ср. уровень $\approx 0,82$ МПа	Заполнение из КЦ № 1 и нагнетание в продувочный канал № 7, $\approx 0,33$ МПа
ВПП № 6		Нагнетание из КЦ № 3 при малых градиентах давлений, ср. уровень $\approx 0,67$ МПа	Заполнение из КЦ № 4 и нагнетание в ресивер № 8, $\approx 0,18$ МПа
Продувочный канал № 7		Разобщен	Продувка, $\approx 0,15$ МПа
Ресивер № 8		Состояние практически неизменное	Состояние практически неизменное
РЦ № 9	Продув. кна	Закрыты	Открыты
	Вып. окна	Закрыты	Открыты
	Горение	$\alpha=2,56$	-
	Состояние	Начало рабочего хода вблизи ВМТ, 22,156 МПа	Продувка, содержание п.с. $\leq 0,03$, $\approx 1,00$ МПа
Выпускной патрубок № 10		Заполнен малоподвижным высокотемпературным столбом газа с низким содержанием п.с.	Истечение газовой смеси при температуре $\approx 600\text{K}$ и $\lambda=0,15 - 0,2$

Литература

1. Чуян Р.К. Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.
2. Месарович М., Мако Д., Такаха И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 342 с.
3. Амброжевич М.В. Комплексно-сопряженная модель рабочего процесса в авиационном двухтактном поршневом двигателе // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: Сб. науч. тр. – Харків: ХАІ, 2002. – Вып. 30. Двигуни та енергоустановки. – С. 37-42.*
4. Амброжевич М.В. Интегрированная технология опережающих исследований рабочего процесса в авиационном двухтактном поршневом двигателе // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: Сб. науч. тр. – Харків: ХАІ, 2003. – Вып. □. Двигуни та енергоустановки. (в печати).*

5. Потапенко А.А., Амброжевич А.В. Способ работы реактивной установки малой тяги с поршневым двигателем и устройство для его осуществления. Заявка на изобретение №2003054210 от 12.05.2003.

6. Потапенко А.А., Амброжевич М.В. Перспективные двухтактные мотокomppressorные воздушно-реактивные двигатели малых тяг // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: Сб. науч. тр. – Харків: ХАІ, 2003. – Вып. □. Двигуни та енергоустановки. (в печати)*

7. Бондарев А.Е., Бондарев Е.Н. Функции визуализации в вычислительной аэрогазодинамике // *Полет. – 2000. – № 10. – С. 53-60.*

Поступила в редакцию 15.05.03

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор И.М. Приходько, ХВУ, г. Харьков; канд. тех. наук, ст. науч. сотр. А.Е. Дёмин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.