

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЕРАРХИИ МОДЕЛЕЙ ГАЗА ПРИ КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ И ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

ФГБОУ ВПО Ковровская государственная технологическая академия им. В.А.Дегтярева, Россия, г. Ковров,
e-mail: rambler13@inbox.ru

Волгин М.А.

Разработана иерархическая цепочка математических моделей газа, которая использована при построении компьютерной модели теплового двигателя внешнего сгорания. На основе компьютерного моделирования установлены основные закономерности функционирования теплового двигателя, выполнен анализ влияния изменения параметров на его характеристики и разработан вариант конструкции двигателя. Предполагается дальнейшее использование и совершенствование иерархии моделей при экспериментальной проверке характеристик теплового двигателя.

Ключевые слова: тепловой двигатель внешнего сгорания, компьютерное моделирование, иерархии математических моделей.

THE USE OF HIERARCHY OF GAS MODELS AT COMPUTER MODELLING AND DESIGNING OF THE THERMAL ENGINE

Kovrov state technological academy of a name of V.A. Degtyarev, Russia, Kovrov, e-mail: rambler13@inbox.ru

The hierarchical chain of mathematical models of gas which is used at construction of computer model of the thermal engine of external combustion is developed. On the basis of computer modeling the basic laws of functioning of the thermal engine are established, the analysis of influence of change of parameters on its characteristics is made and the variant of a design of the engine is developed. The further use and perfection of hierarchy of models at experimental check of characteristics of the thermal engine is supposed.

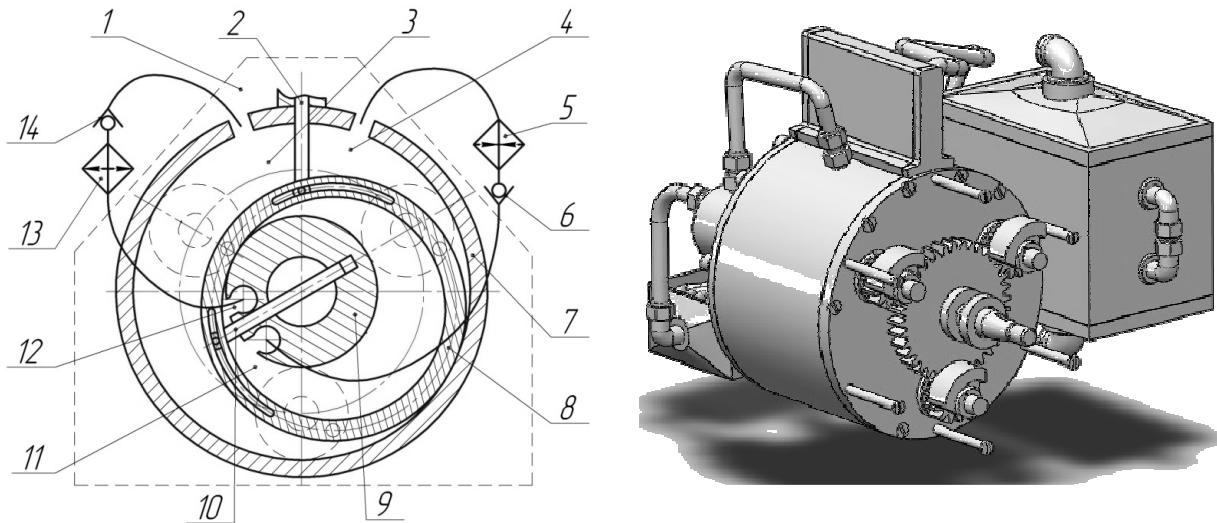
Key words: the thermal engine of external combustion, computer modeling, hierarchies of mathematical models.

Тепловые двигатели внешнего сгорания (двигатели Стирлинга) широко применяются в стационарных объектах, в космосе, на подводных лодках, а в последние годы они получили применение в автомобилях (разработки фирм Daimler Benz, Philips, United Stirling) [3,8,10]. Это обусловлено рядом их преимуществ: возможность работы от любого внешнего источника тепловой энергии, закрытый рабочий цикл, бесшумность и большой ресурс работы, малые эксплуатационные затраты, экологичность.

Целью данной работы является многовариантный анализ одной из новых схем роторно-поршневого двигателя Стирлинга (РПДС) и выбор его рациональных параметров для последующего конструирования. Для решения задачи используется метод компьютерного моделирования (КМ) с применением на этапе разработки математического описания иерархических цепочек моделей газа в развитие иерархии, предложенной в [9], С.134.

Схема РПДС и его 3D-модель показаны на рис.1. Он включает роторную объемную машину 1, соединенную с теплообменниками: нагревателем 5 и хо-

лодильником 13. Цилиндрический поршень 8 совместно с шиберами 2 и 10, движущимися в радиальных направляющих, делит пространство между корпусом 7 и статором 9 на 4 полости, в которых происходят рабочие процессы.



1- роторная объемная машина; 2,10 - шибера; 3,4 - наружные полости расширения и сжатия (НР и НС); 5 - нагреватель; 6,14 - обратные клапаны; 7 - корпус; 8 - поршень; 9-статор, 11,12 - внутренние полости сжатия и расширения (ВС и ВР); 13- холодильник

Рис.1. Схема и 3D-модель РПДС

Рассмотрим принцип действия РПДС, начиная с положения поршня, когда объем полости 4 минимален, а шибер 2 находится в верхнем положении. Газ с высоким давлением и температурой поступает из нагревателя 5 в рабочую полость 4, где, расширяясь, совершает работу. После совершения одного оборота поршня 8 газ остается в полости сжатия 3, происходит так называемое «переключение» полостей 4 и 3. Из полости 3 газ через холодильник 13 вытесняется во внутреннюю полость расширения 12 (в это время полость 11 сжимается). Затем происходит аналогичное «переключение» внутренних полостей 12 и 11, которое примерно соответствует положению поршня, показанному на рис.1. В полости 11 газ сжимается до высокого давления, а затем поступает в полость нагревателя 5 через обратный клапан 6. Далее цикл повторяется.

Анализ принципа действия РПДС показывает, что он является сложной технической системой с переменной структурой, в которой одновременно протекают взаимосвязанные процессы различной физической природы: механические, тепловые и термогазодинамические. Классические алгебраические методы анализа его характеристик (см. [8, 10]) не приемлемы. Поэтому для анализа

и синтеза двигателя использован метод КМ (см., например,[5, 9]), широко применяемый в различных отраслях наук. Он включает разработку математического, информационного и программного обеспечения, вычислительные эксперименты с целью исследования сущности физических процессов в объекте, а также определения его рациональных (оптимальных) параметров. На этой основе ведется проектирование и конструирование объекта и последующая верификация моделей.

Для построения математического описания разработана иерархическая цепочка моделей газа, которая показана на рис.2. Исходными для нее являются одномерные уравнения газовой динамики, которые в более общей иерархии моделей, предложенной в работе [9], С.134, обозначены номером 12. Они включают уравнения трех законов сохранения, дополненные термическим и калорическим уравнениями состояния газа.



Рис.2. Иерархическая цепочка уравнений для газа при моделировании РПДС

Переходы от уравнений верхнего уровня к уравнениям более низкого уровня происходят посредством принятия упрощающих допущений.

Переход «1-2» происходит при условии равенства нулю производной по времени. Далее уравнения разрешаются относительно распределений давления

и температуры по длине трубопровода для произвольного уравнения состояния газа, что хорошо изложено в [6]. Переход «2-5» происходит при условии равенства нулю числа Маха в уравнениях 2, дальнейший переход к алгебраическим формулам Дарси и Шухова для теплогидравлических расчетов теплообменников РПДС происходит путем интегрирования уравнений 5.

Переход «1-3» происходит при исключении производных по пространству, когда скорость газа в локализованном объеме предполагается равной нулю, а деформация объема и массовый расход газа через отверстия (формула Сен-Венана) определяется на основе закона сохранения импульса (см., например, [4]). Для описания остаются законы сохранения массы и энергии в полости.

Уравнение 4 является, по сути, законом сохранения энергии. Переход к более низким уровням иерархической цепочки происходит при принятии допущений о характере теплообмена, изменения давления и объема. Это известные изотермические, адиабатные, изобарные и изохорные модели и процессы, которые на рис.2 обозначены условно номерами с точкой.

Разработанная иерархическая цепочка является методической основой для построения модели РПДС (так же как [2] применительно к физике в средней школе). Она дополняется уравнениями механики для определения объемов полостей в функции угла поворота поршня, а также критериальными зависимостями для расчета коэффициентов теплообмена в змеевиках теплообменников (см., например, [5], С.67).

Компьютерная модель в нескольких вариантах реализована в программе [1], которая разработана в среде Matlab. Программа имеет возможность вывода результатов в табличной и графической форме, в ней имеется база данных по газам, ведется архив реализованных проектов.

В основе программы лежит алгоритм, представленный на рис.3. Он предполагает последовательное интегрирование уравнений для каждой из полостей (хотя процессы в полостях происходят одновременно), начиная с полости сжатия ВС (см. рис.1), с проверкой выполнения законов сохранения массы и энергии в ней для окончания цикла поиска установившегося решения задачи.

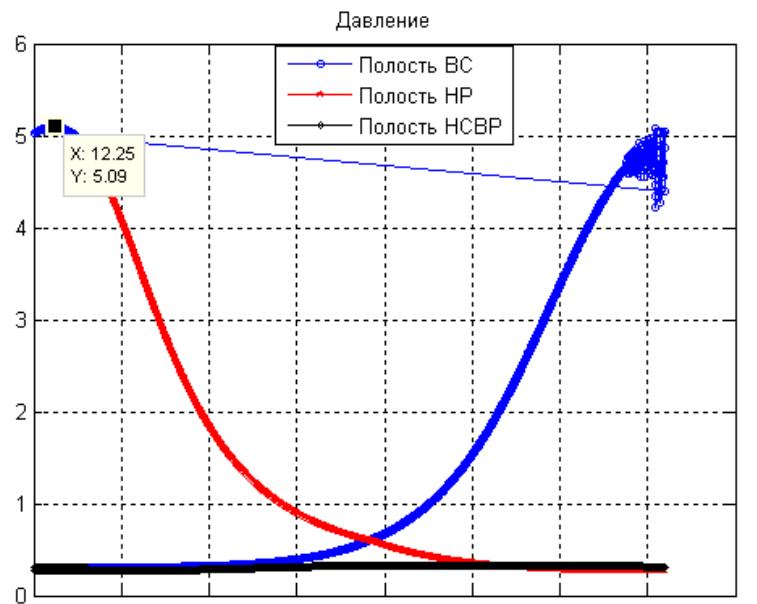


Рис.3. Блок-схема алгоритма расчета РПДС

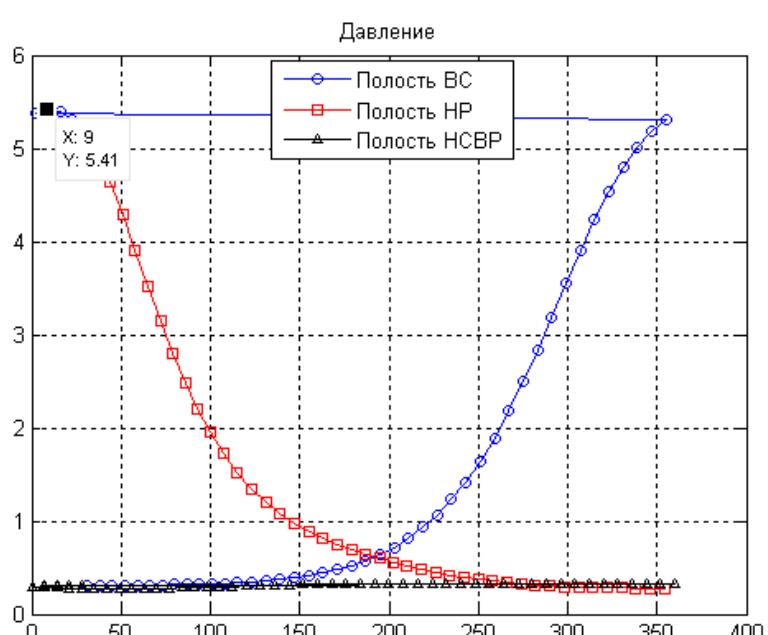
Первоначально для моделирования процессов в РПДС за основу выбраны уравнения 3 (газ – идеальный). Исследование модели показало неустойчивость процесса интегрирования в областях «переключения», где объем полости фактически равен нулю (расход газа соизмерим с массой газа). Поэтому дополнительно разработана упрощенная модель на основе уравнения 4. Его решение на каждом шаге интегрирования ведется в два этапа: сначала используется уравнение адиабаты (модель 10.1 на рис.2), а потом энергия газа корректируется в

цикле за счет учета теплообмена. Коммутация объемов полостей предполагается мгновенной и рассчитывается по законам сохранения массы и энергии.

С целью проверки адекватности упрощенной модели был выполнен ее сравнительный анализ с моделью на основе уравнений типа 3. На рис.4 приведены результаты расчетов по программе [1] в форме графиков давлений. Их анализ показывает, что результаты расчета хорошо согласуются, но в решении по уточненной модели возникают вибрации (а иногда неустойчивость) давления в полости ВС, когда угол поворота поршня приближается к 360° . Поскольку упрощенная модель РПДС требует меньших ресурсов, дает устойчивое решение, то она использована для вычислительных экспериментов.



а) уточненная модель (типа 3)



б) упрощенная модель (типа 4)

Рис.4. Графики изменения давления в полостях РПДС

В процессе исследований выполнен анализ влияния конструктивных и эксплуатационных параметров РПДС на его характеристики [2]. Он показал, что двигатель имеет оптимальное значение угла фазового сдвига в работе внешних и внутренних полостей (около 30°), мощность двигателя можно регулировать изменением начального давления газа в полости ВС и изменением угла фазового сдвига, двигатель работоспособен до температур нагревателя 600К (снижаются его характеристики). Также выполнены исследования влияния типа рабочего тела на характеристики двигателя, которые показали, что применение гелия и его смесей наиболее перспективно. Результаты анализа хорошо согласуются с приведенными в [8, 10].

В результате исследований РПДС определены рациональные отношения объемов рабочих полостей, нагревателя и холодильника, что позволило разработать его 3D-модель (см. рис.1) и рабочие чертежи.

Таким образом, использование разработанной системы математических моделей в форме иерархической цепочки, показанной на рис.2, позволило решить задачи комплексного исследования функционирования РПДС методом КМ и разработки его конструкции для изготовления и испытаний.

Ценность разработанной иерархии моделей для газа этим не исчерпывается. В процессе экспериментальных исследований РПДС, возможно, потребуется доработка математического и программного обеспечения (например, более детальное описание процессов в теплообменниках, учет утечек, свойств реального газа). С этой целью можно использовать существующую иерархическую цепочку или частично модернизировать ее.

Полагаем также, что разработанная иерархическая структура может быть полезна при компьютерном моделировании тепловых двигателей, реализованных по другим кинематическим схемам (в том числе для двигателей внутреннего сгорания), а также в качестве методического материала в учебном процессе вузов и, возможно, в школьном образовании (по аналогии с [2]).

Список литературы

1. Волгин М.А., Крылов И.А., Никишкин С.И. Программа «Анализ характеристик роторно-поршневого двигателя Стирлинга» // М.: Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». – №5(24). – 2011. №17100. – С.17-18.
2. Волгин М.А., Рябов Г.К. Компьютерное моделирование и анализ характеристик роторно-поршневого двигателя Стирлинга // Информационные технологии моделирования и управления. – Воронеж: Научная книга, 2011. – №4(69). – С.418-426.
3. Живодробова С.А. Иерархия математических моделей при обучении физике в средней школе: Автореферат дис. канд. педагог. наук. – Санкт-Петербург, 2007. –18 с.
4. Кириллов Н.Г. Производство двигателя Стирлинга – новая отрасль в машиностроении XXI века // М.: Турбины и дизели, 2010. – №3. – С.1-5.
5. Математические модели систем пневмоавтоматики. / Ю.Л. Арзуманов, Е.М.Халатов, Р.А. Петров. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009. – 296 с.
6. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – Изд. 2-е, стереотип. М., Энергия, 1977. – 344 с.
7. Неизотермическое течение газа в трубах / Под. ред. О.Ф. Васильева. – Новосибирск: Наука, 1978. –127 с.
8. Ридер Г., Хупер Ч. Двигатели Стирлинга. – М.: Мир, 1986. – 464 с.
9. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Наука, 2003. – 320 с.
10. Уокер Г. Двигатели Стирлинга / Пер. с англ. Б. В. Сутугина и Н. В. Сутугина. – М.: Машиностроение, 1985. – 408 с.

Рецензенты:

Шалумов А.С., д.т.н., профессор, зав. кафедрой информационных технологий, Владимирский филиал Российской академии государственной службы при Президенте РФ, г. Владимир.

Увайсов С.У., д.т.н., профессор кафедры РТУиС Московского государственного электротехники и математики (технического университета), г. Москва.

Работа получена 20.09.2011.