

электрогенераторов к тепловым машинам Стирлинга с радиоизотопным источником тепла. В связи с этим расчёт параметров и дальнейшая их оценка проводились на основе данных полученных из массива статей для бортовых СЭС на основе свободнопоршневых машин Стирлинга, в т.ч. с оппозитно установленными поршнями (SRG) и (ASRG), электрогенераторов на основе термоакустических двигателей (ТАРС), термоэлектрических электрогенераторов (eMMRTG, MMRTG).

Анализ полученных значений с помощью точечных диаграмм зависимостей термического КПД и генерируемой мощности показал, уровни вырабатываемой электрической мощности на начало/конец срока активного существования (BOL/EOL) различных типов машин Стирлинга и ТАРС находятся примерно в одном диапазоне 126...492 Вт, однако для традиционных машин Стирлинга (SRG, ASRG) происходит значительное снижение уровня генерируемой мощности в конце срока активного существования до уровня 104...409 Вт. Уровень удельной мощности свободнопоршневого двигателя SRG выше, чем для оппозитного свободнопоршневого двигателя Стирлинга (ASRG), что связано с повышением массогабаритных характеристик ASRG вследствие оптимизации холодной части двигателей. Оппозитная компоновка ASRG снижает вибрации, однако высокотемпературные условия работы поршней значительно снижают ресурс и эффективность, требуют специальных конструктивных решений и материалов в отличие

от ТАРС. Термический КПД на начало срока активного существования для свободнопоршневых двигателей Стирлинга составляет порядка 22...24%, удельная мощность находится в диапазоне 7.5-8 Вт/кг. Изменение холодной температуры до уровня 4К, что соответствует условиям работы СЭС в условиях глубокого космоса, значительно увеличивает удельную мощность ТАРС на основе термоакустического двигателя Стирлинга. Технология термоакустического преобразования энергии имеет наибольшую удельную мощность, используя при этом в качестве источника тепла только 25% массы  $Pu^{273}$  перспективного модульного термоэлектрического генератора (eMMRTG). Общая масса СЭС на основе ТАРС на 70% меньше термоэлектрического генератора и на 25% - СЭС на основе традиционных оппозитных двигателей Стирлинга (ASRG). Можно сделать вывод, что при равных количествах изотопного топлива технология термоакустического преобразования тепловой энергии в электрическую является более эффективной по уровню вырабатываемой мощности при сохранении уровня эффективности до конца срока активного существования.

Полученные сравнительные данные позволяют сделать выводы о совершенстве преобразования энергии и эффективности её использования в ТАРС, характеризующиеся гарантированными удельными характеристиками СЭС в конце срока активного существования КА, повышенным ресурсом и стойкостью СЭС при воздействии факторов космического пространства.

УДК 536.8

## **РАСЧЁТ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКИ-ИНЕРЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНТРОЛЬНЫХ ОБЪЁМОВ**

©2018 А.И. Довгялло, А.А. Воробьёв, С.О. Некрасова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

## **CALCULATION OF THE WORKING PROCESS OF A THERMAL-LAG ENGINE WITH THE METHOD OF CONTROL VOLUMES**

Dovgyallo A.I., Vorobev A.A., Nekrasova S.O. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

*This article deals with calculation of the working process of an external heat engine such as thermal lag engine with the method of two control volumes. Calculation shows that the intensity of heat transfer in the cold volume allows sufficiently increase the efficiency of the engine.*

Изобретение тепловых двигателей открыло человечеству возможность получения механической работы из тепловой энергии. Недостатком данного аспекта является то, что для получения полезной работы, помимо процесса подвода тепла, необходимо организовывать и процесс отвода тепла. Отводимое тепло считается потерянным, если не использовать дополнительные устройства, способные получать из него выгоду.

Двигатели внешнего подвода тепла способны использовать тепловую энергию, подводимую к ним от любого источника тепла, в том числе и отводимую при работе другого двигателя теплоту, и эффективность данных двигателей зависит в основном от температурной разницы между холодным и горячим объёмами.

В настоящее время, наиболее исследованными и распространёнными из класса двигателей внешнего подвода тепла являются двигатели, работающие по циклу Стирлинга. Очевидным недостатком данных систем является наличие сложных механических соединений, способных обеспечить перекачку рабочего тела между горячей и холодной полостями. Альтернативой данным системам может стать двигатель с пульсационной трубой, преимуществом которого является отсутствие вытеснителя в горячей зоне. Единственный поршень в холодной полости играет двойную роль, как получения полезной работы, так и поддержания колебательного процесса. Однако, в строгом смысле, не получено описание факторов, которые отвечают за регулировку перемещения рабочего тела, и, как результат, получение полезной работы. ДПТ называют также термически инерционным, что не вполне явно описывает механизм реализации рабочего цикла задержкой между теплообменом и перемещением рабочего тела.

Существующие математические модели имеют множество параметров, характерных для экспериментальных образцов, на основе которых они проходили апробацию. Помимо этого, разработанные на их основе методики проектирования учитывают и особенности программных пакетов, в которых они были реализованы. То есть имеющиеся конструктивные схемы ДПТ и их математические описания обладают определёнными

особенностями, не позволяющими прийти к единому пониманию в т.ч. и конструктивных факторов, влияющих на рабочий процесс.

Таким образом, разработка и апробация математической модели, способной описать рабочий процесс двигателя с пульсационной трубой в любой конструктивной вариации, является перспективным направлением в данной области исследований.

Целью данной работы было упрощённое описание рабочего процесса ДПТ для проведения укрупнённого анализа основных закономерностей и факторов, влияющих на эффективность и производительность, без больших вычислительных затрат. Для этого был выбран метод контрольных объёмов, который позволяет впоследствии перейти к более детализированной модели на основе термодинамики переменной массы.

Двигатель разбивался на две полости: горячую с постоянным объёмом и холодную с изменяемым объёмом, которые обменивались между собой энтальпией и массой, то есть

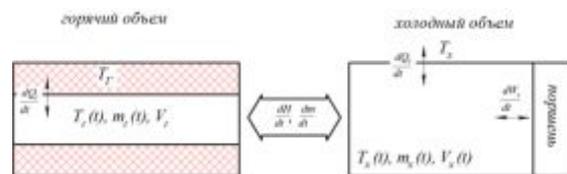


Рис. 1. Схематичное изображение математической модели

Модель базируется на классических уравнениях сохранения массы и энергии, традиционных для термодинамики переменной массы:

. Отличием разработанного математического описания от применённых ранее подходов было исследование влияния коэффициентов теплоотдачи, рассчитываемых отдельно для холодной и горячей полостей. Полученная система дифференциальных уравнений решалась с помощью метода конечных разностей, реализованного с помощью явной схемы для метода Рунге-Кутты первого порядка (метода Эйлера).

Апробация модели контрольных объёмов проводилась на результатах экспериментальных исследований для различных схем ДПТ. В результате было установлено, что разработанная модель имеет хорошее соот-

ветствие с результатами эксперимента при низких значениях рабочих частот. Данное явление объясняется значительным влиянием сил инерции на рабочий процесс термически-инерционного двигателя при больших скоростях течения рабочего тела. Это диктует особые требования к описанию процессов теплообмена в полостях при осциллирующем движении газа с частотой рабочего процесса порядка 25...30 Гц.

Разработанная модель контрольных объёмов для двигателя с пульсационной тру-

бой позволяет оценивать влияние асимметрии термодинамического цикла термически-инерционного двигателя с помощью осреднения коэффициента теплоотдачи в холодной области за такт, а не за цикл. Можно сделать вывод, что интенсивность теплообмена в холодной полости и частота рабочего процесса оказывает наибольшее влияние на эффективность термически-инерционного двигателя.

УДК621.454.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ «КИСЛОРОД—КЕРОСИН» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2018 Т.А. Чубенко, А.Д. Максимов, В.М. Зубанов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

### RESEARCH OF THE COMBUSTION MODEL "OXYGEN—KEROSENE" FOR WORKING PROCESSES MODELING OF THE ROCKET ENGINE CHAMBER

Chubenko T.A., Maximov A.D., Zubanov V.M. (Samara National Research University,  
Samara, Russian Federation)

*The article presents the results of modeling processes of combustion of fuel «oxygen-kerosene». Received distribution of parameters for three combustion models in the flow part of chamber.*

При создании ЖРД необходимо иметь исчерпывающую информацию о газодинамических параметрах в проточной части, предопределяющих совершенство рабочих процессов, энергетические характеристики, состояние конструкции. Не так давно задачи по нахождению этих параметров, в основном, решались экспериментальным методом.

Существенно уменьшить время определения характеристик ЖРД позволяет моделирование рабочих процессов с помощью вычислительной гидрогазодинамики (CFD), так как при этом возможно определить параметры процессов, не прибегая к ресурсоёмким испытаниям.

Для определения параметров камеры ЖРД необходимо учитывать процессы горения, являющиеся наиболее сложными из протекающих в камере.

Данная работа посвящена исследованию модели горения «кислород-керосин» для моделирования рабочих процессов в камере ЖРД.

В качестве предмета исследования был выбран двигатель с тягой 1760 кН и давлением в камере сгорания 14,6 МПа спроектированный по методике [1].

Геометрия камеры была построена в программе NX 8.5., её сеточная модель создана в программе ANSYS Meshing. Чтобы увеличить качество расчёта, проводились следующие мероприятия: создавались выходящая область и пристенок, в пристеночном слое сетка измельчалась по наружной поверхности, в критическом сечении и в переходе от ядра к пристенку. Сеточная модель состояла из 830 тысяч элементов.

Для расчёта указывались граничные зоны, где задавались массовые доли веществ, массовый расход через ядро и пристенок, давление в камере сгорания и на срезе сопла.

Было проведено исследование нескольких моделей горения:

1. Замороженное течение с составом продуктов сгорания, определённым из термодинамического расчёта в программе TERRA [2];