

РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ, ГОРЕНИЯ КИСЛОРОДНО-ВОДОРОДНОЙ СМЕСИ И ПРОГРЕВА КОНСТРУКЦИИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО СТЕНДА В СВЯЗАННОЙ ПОСТАНОВКЕ

О. А. Баулин, Р. Н. Жучков, М. В. Заузолков, П. А. Машенькин, К. Н. Шавлач

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Особенностью полета гиперзвукового летательного аппарата (ГЛА) является движение в условиях воздействия интенсивного конвективного теплового потока, вызывающего разогрев и разрушение теплозащитного покрытия. Поэтому разработка ГЛА всегда сопряжена с экспериментальной обработкой их габаритных макетов и образцов теплозащитных материалов.

В настоящее время для моделирования натуральных условий теплового нагружения макетов ГЛА в наземных условиях используются установки различных типов (плазмотроны, установки на базе электродуговых подогревателей, твердотопливных и жидкостных ракетных двигателей и т. д.). Одним из широко распространенных способов создания теплового нагружения на макеты ГЛА является использование тепломеханических стендов (ТМС), работающих на принципе сжигания смеси газов кислорода и водорода. Кислородо-водородные ТМС, как правило, оснащаются камерой сгорания (КС), в которую подаются компоненты горючей смеси. Регулирование параметров смеси осуществляется посредством подбора сменных расходомерных шайб на входе в КС и настройки газовых редукторов на нужное давление.

Эксплуатационные параметры ТМС могут быть выбраны исходя из режима нагружения, требуемого для конкретной задачи, и, в том числе, для режима максимальных аэротермомеханических нагрузок. Для успешной эксплуатации ТМС необходимо расчетное обоснование режимов его работы, которое, в основном, заключается в следующем:

1) определение зависимости между различным соотношением рабочих параметров (давлением газов, диаметрами расходомерных шайб) и газодинамическими параметрами продуктов сгорания (давление, плотность, температура, скорость, стехиометрический состав);

2) определение области допустимых режимов работы, при которых обеспечивается сохранность камеры сгорания (КС) ТМС (в том числе с целью недопущения перегрева и выхода из строя дорогостоящей матчасти).

Выбор и обоснование эксплуатационных параметров ТМС предполагается проводить с использованием численного моделирования. Для проведения численного моделирования газодинамических и химических процессов в КС использован современный ПК ЛОГОС, разработки РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Описание процессов смесеобразования (перемешивания газов), горения и формирования струи продуктов сгорания внутри КС представляет сложную научно-техническую задачу, от решения которой зависит совершенство конструкции ТМС и безопасность проводимых исследований.

В данном докладе представлены результаты одного варианта расчета, с целью демонстрации возможностей используемого программного комплекса и выявления общих закономерностей протекающих процессов.

Исходные данные

Эскиз и трехмерная модель КС ТМС представлены на рис. 1 и 2, соответственно [1].

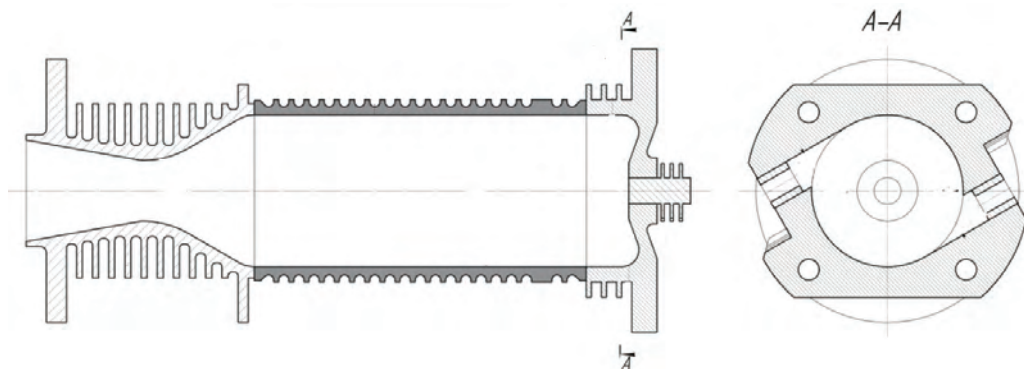


Рис. 1. Эскиз КС ТМС (заявка RU 2018106185 приоритет 19.02.2018)

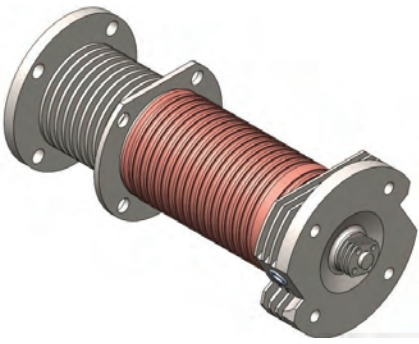
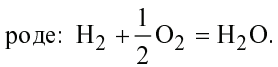


Рис. 2. Трехмерная модель КС ТМС

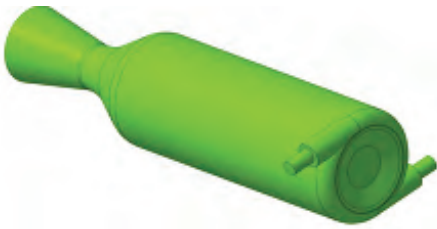
Для проведения расчета выбраны следующие рабочие параметры:

- давление кислорода O_2 на входе в КС – 8,7 атм.
- давление водорода H_2 на входе в КС – 4 атм.
- диаметры расходомерных шайб – 20 мм (одинаковые для O_2 и H_2).

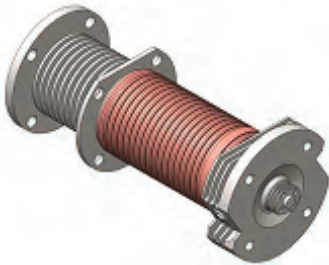
Расчеты проведены в нестационарной связанной постановке: в модуле ЛОГОС-Аэрогидромеханика рассчитывается смешение и горение рабочих газов в КС и истечение продуктов сгорания, а в модуле ЛОГОС-Тепломассоперенос – распространение тепла от внутреннего объема по конструкции КС и отвод тепла с ее поверхности. При этом процесс горения зависит от температуры стенки КС, а подводимая к ней теплота – от температуры продуктов сгорания. При проведении расчетов разветвленно-цепные реакции не учитывали. За основу принята основная простая реакция горения водорода в кислороде:



На рис. 3 представлены использованные расчетные модели.



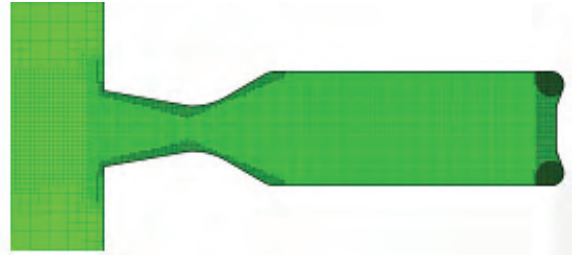
а



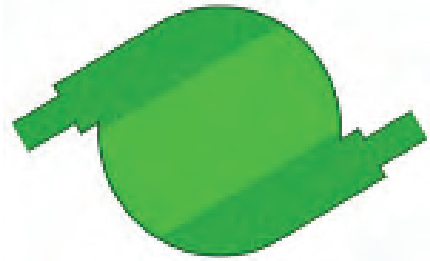
б

Рис. 3. Расчетные модели: а – модель для расчета смешения и горения рабочих газов в ЛОГОС-Аэрогидромеханика (форма повторяет внутренний обвод КС); б – модель для расчета прогрева конструкции КС в ЛОГОС-Теплопередача

На моделях построены расчетные сетки, представленные на рис. 4–5. Общее количество ячеек для газодинамической задачи, решаемой модулем ЛОГОС-Аэрогидромеханика, составило ~ 2 млн., для задачи теплообмена, решаемой ЛОГОС-Тепломассоперенос, ~ 1,1 млн.

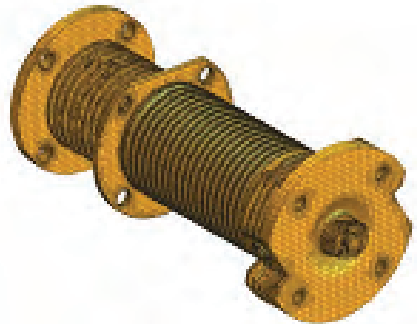


а

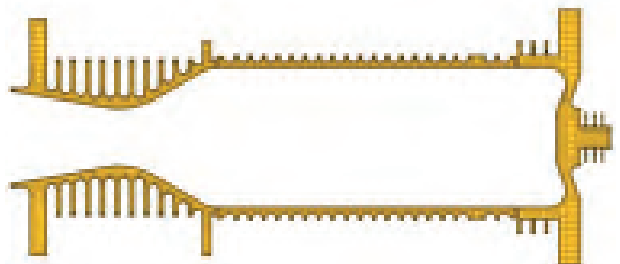


б

Рис. 4. Расчетная сетка, использованная в ПК ЛОГОС для газодинамической задачи: а – продольное сечение; б – поперечное сечение (в месте подвода рабочих газов)



а



б

Рис. 5. Расчетная сетка, использованная в ПК ЛОГОС для задачи теплообмена: а – трехмерная модель; б – продольное сечение

Численное моделирование в части смешения и горения рабочих газов

Результаты расчетов газодинамической части задачи представлены в виде полей концентраций кислорода O_2 , водорода H_2 и паров воды H_2O в разные моменты времени в четырех поперечных сечениях с шагом 100 мм (см. рис. 7). Схема расположения сечений представлена на рис. 6.

Дополнительно поля концентраций кислорода и водорода в КС ТМС представлены в объемном виде на рис. 8–9.

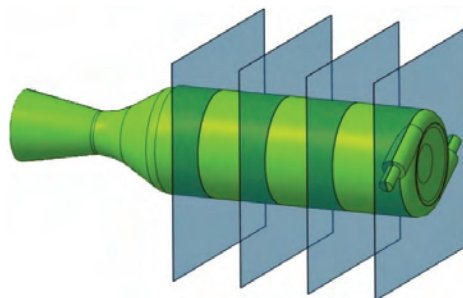


Рис. 6. Схема расположения поперечных сечений

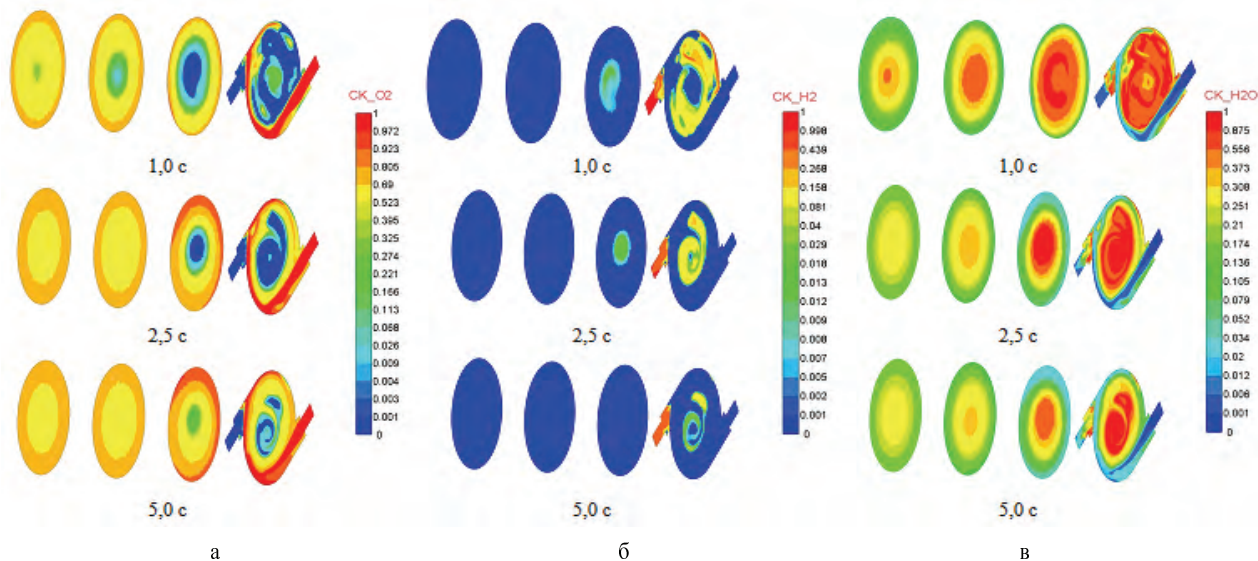


Рис. 7. Поля концентраций в поперечных сечениях в разные моменты времени: а – кислорода (O_2), б – водорода (H_2), в – паров воды (H_2O)

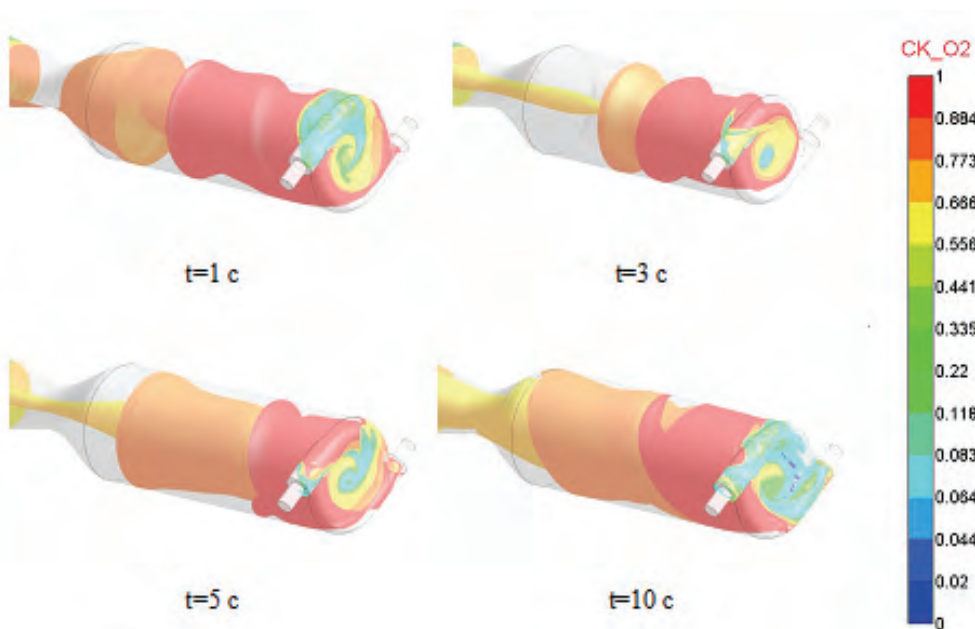


Рис. 8. Поле концентрации кислорода



Рис. 9. Поля концентрации водорода

На рис. 10 представлены линии тока в объеме камеры сгорания.

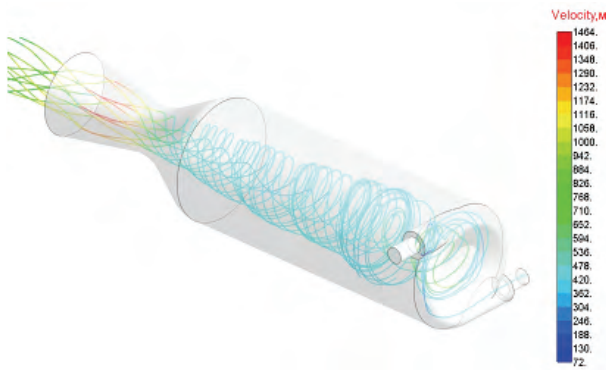


Рис. 10. Линии тока в объеме КС

Из анализа рис. 7–10 следует:

– происходящие в КС газодинамические и химические процессы существенно не стационарны, так как установление постоянного стехиометрического состава смеси в рассмотренных сечениях не происходит. Возможно, это связано с тем, что при выбранных величинах давлений и диаметрах расходомерных шайб струя кислорода «перебивает» струю водорода, препятствуя ее выходу в КС (см. концентрации реагентов). Таким образом, горение происходит непосредственно в окрестности подвода водорода во внутренний объем КС. Так как скорость протекания реакции больше скорости подвода водорода при данном давлении, то водород сгорает порциями, при этом реализуется импульсный режим работы ТМС. Из изложенного следует, что для реализации стационарного режима работы ТМС необходимо использование других соотношений давлений и расходомерных шайб.

– весь подводимый водород сгорает в окрестности зоны его подвода в объем КС, не достигая выхода из сопла, так как концентрация водорода в основном ее объеме равна нулю.

– течение в камере сгорания имеет значительную радиальную составляющую скорости.

На рис. 11 представлено поле давления газа в КС ТМС через 10 с после запуска установки.

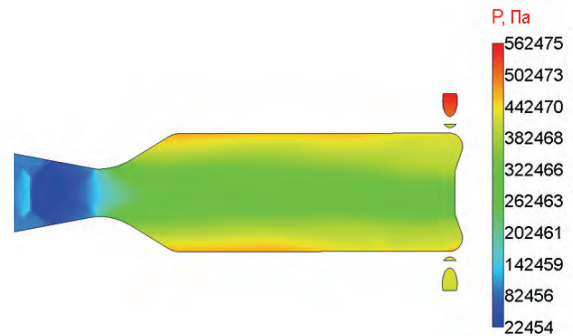


Рис. 11. Поле давления в КС ТМС

Давление возле стенок КС несколько превышает давление в центральной части, что обусловлено высокой радиальной составляющей скорости ($V_{R \max} \approx 800$ м/с). Кроме того давление продуктов сгорания в зоне подвода водорода (внутри КС) оказывается соизмеримым с давлением водорода на входе в КС, что затрудняет выход водорода, его активное смешение с кислородом и в результате локализует зону горения непосредственно в окрестности его подвода к КС. При этом тепловые нагрузки на конструкцию КС локализуются в этой же зоне и приводят к резкому нагреву стенки. Расход рабочих газов в таком режиме неэффективен, так как $\sim 60\%$ кислорода выходит из КС не прореагировав с водородом.

Численное моделирование в части прогрева камеры сгорания

Результаты расчета прогрева конструкции КС представлены в виде полей температуры в разные моменты времени (см. рис. 12).

Зависимость температуры, реализующейся на внутренней поверхности КС в нескольких характерных точках конструкции (см. рис. 13), от времени работы ТМС представлена на рис. 14.

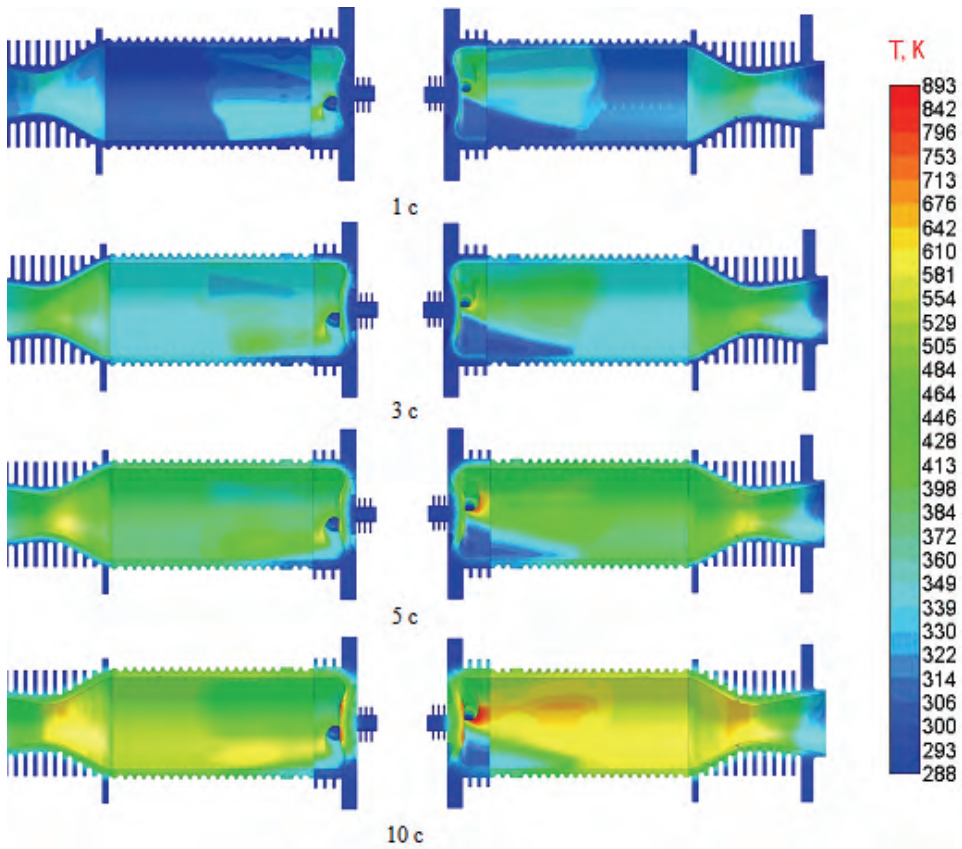


Рис. 12. Поле температур в двух половинах КС (со стороны подвода H_2 – слева и со стороны подвода O_2 – справа) в разные моменты времени

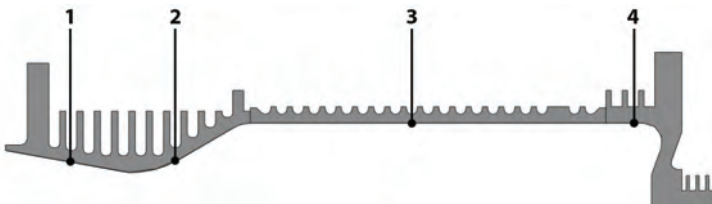


Рис. 13. Схема расположения точек

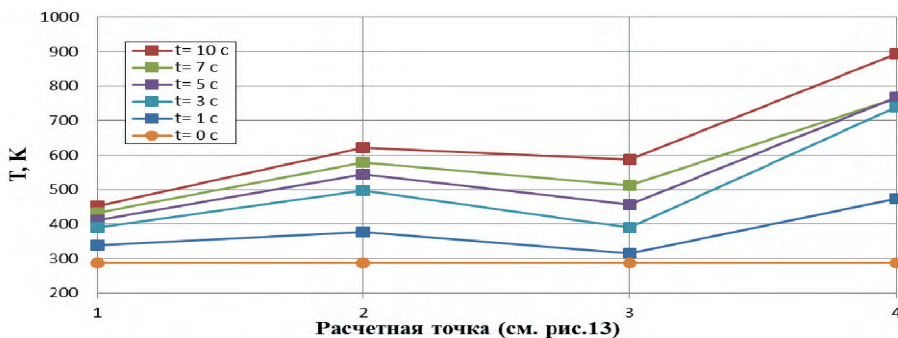


Рис. 14. Зависимость температуры на внутренней поверхности КС от времени

КС состоит из трех основных частей: блока подвода рабочих газов, выполненного из нержавеющей стали, цилиндрической медной части и стального сопла. Из анализа рис. 14 следует, что максимальная температура реализуется в первой части (точка 4 на рис. 13). Таким образом, максимальное безопасное время работы ТМС будет определяться максимальной рабочей температурой нержавеющей стали.

Заключение

В результате расчета определено, что:

1) происходящие в КС газодинамические и химические процессы существенно не стационарны, что определяется неоптимальными параметрами, выбранными для расчета;

2) процесс горения не распространяется по большей части объема КС, а локализован в окрестности места подвода водорода, что приводит к переизбытку кислорода на выходе из КС и неблагоприятно сказывается на тепловых режимах блока подвода рабочих газов.

На примере решения задачи смешения и горения газов в КС ТМС с использованием выбранных эксплуатационных параметров, продемонстрированы возможности программного комплекса ЛОГОС по решению задач данного класса. Визуализированы и проанализированы результаты решения, показаны основные закономерности протекающих физических процессов.

Выбор эксплуатационных параметров ТМС зависит от условий конкретных задач и может быть осуществлен по результатам серии подобных оптимизационных расчетов.