



УДК 62–64/662.99:53.04:62–71

*А.Л. Куранов, А.В. Корабельников, А.М. Михайлов***КОНВЕРСИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА
В ЭЛЕМЕНТАХ ТЕПЛОЗАЩИТЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ***A.L. Kuranov, A.V. Korabelnikov, A.M. Mikhaylov***CONVERSION OF HYDROCARBON FUEL
IN AIRCRAFT THERMAL PROTECTION ELEMENTS**

В статье описано экспериментальное исследование возможностей термохимического реактора паровой конверсии углеводородного топлива как элемента теплозащиты. Проведено экспериментальное исследование одиннадцати стационарных режимов течения химически реагирующей смеси с высокой степенью конверсии. Рассчитаны величины теплового потока и степени конверсии. Определены величины удельного теплопоглощения и степень использования хладоресурса.

РЕГЕНЕРАЦИЯ ТЕПЛА; ПАРОВАЯ КОНВЕРСИЯ; ЭНДОТЕРМИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО; ТЕПЛОЗАЩИТА; ОХЛАЖДЕНИЕ; ГИПЕРЗВУКОВЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ.

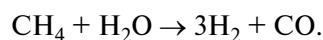
The paper describes hydrocarbon fuels steam reforming thermochemical reactor as a heat protection element experimental study. Studies of 11 stationary regimes of chemically reacting flow with a high degree of conversion were done. The values of heat flow and the degree of conversion were calculated. The values of the specific heat absorption and cooling capacity degree of use were determined.

HEAT RECOVERY; STEAM CONVERSION; ENDOTERMIC FUEL; HEAT PROTECTION; COOLING; HYPERSONIC AIRCRAFT.

В последние годы многие промышленно развитые страны активизировали работы по созданию гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) на углеводородном топливе [1]. В таких аппаратах использование углеводородного топлива возможно только после его преобразования — конверсии — перед подачей в камеру сгорания [2]. При конверсии углеводородного топлива образуется водородсодержащий газ, улучшающий экологические и энергетические характеристики горения. В элементах теплозащиты камеры сгорания и особо теплонапряженных участках обшивки планера используют реакции конверсии, обладающие значительным эндотермическим эффектом (до 200 кДж/моль).

Элементы теплозащиты представляют собой термохимические реакторы (ТХР), в которых протекают различные химические процессы. В данной работе рассмотрена каталитическая реакция паровой конверсии метана (основной

компонент разложения жидкого углеводородного топлива — керосина) [3]:



Использование метана в качестве компонента реакции паровой конверсии позволяет оценить предельные возможности ТХР по теплопоглощению и количеству получаемого водорода [4].

Исследовательский стенд

Стенд паровой конверсии метана предназначен для экспериментального исследования возможностей функционирования ТХР в качестве элемента теплозащиты в условиях воздействия стационарных и нестационарных тепловых потоков с целью определить предельное теплопоглощение, эксплуатационные характеристики ТХР и показатели процесса паровой конверсии, а также предложить оптимальные конструкции и технологию изготовления ТХР с применением планарных и каркасных ката-

лизаторов и средств интенсификации тепло-массообмена.

Принципиальная схема стенда, на котором проводились исследования паровой каталитической конверсии метана, представлена на рис. 1. Стенд состоит из пяти основных узлов: опытного термохимического реактора 6; дугового плазменного нагревателя (плазмотрона) 5; испарителя воды 1 с электронагревателем 2; электронагревателя пара 3; электронагревателя природного газа 4.

Наиболее теплонапряженным узлом установки является дуговой подогреватель ЭДП-109М. Его максимальная мощность составляет 200 кВт. Плазмотрон имеет широкий диапазон регулирования по мощности (от 15 до 200 кВт) [5].

Для подачи в реактор установки водяного пара с заданным расходом используется специальный испаритель. Вышедший из испарителя пар поступает в электронагреватель, в котором происходит его нагрев до температуры 500–700 °С. Этот нагрев осуществляется прямым пропусканием тока через змеевик, по которому проходит пар.

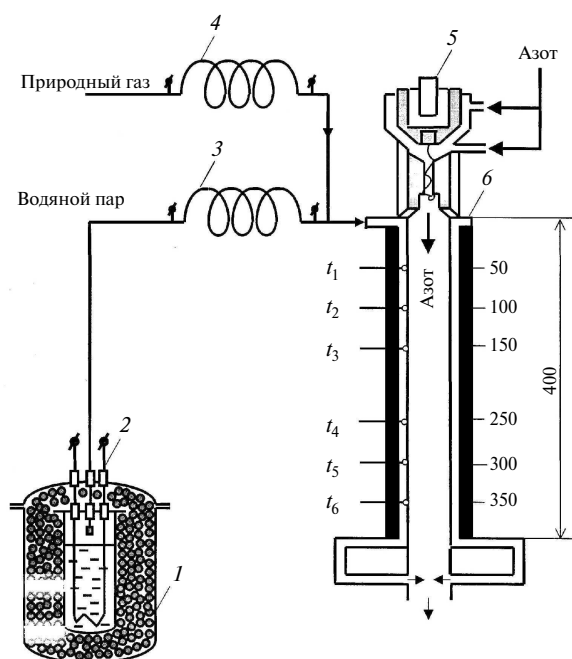


Рис. 1. Принципиальная схема стенда с термохимическим реактором:

- 1 — испаритель воды; 2 — электронагреватель испарителя;
- 3 — электронагреватель пара; 4 — электронагреватель метана;
- 5 — плазмотрон; 6 — термохимический реактор

Метан перед подачей в реактор нагревается до 300–400 °С в змеевике, через который пропускается электрический ток, после чего он смешивается с перегретым паром и смесь поступает во входной коллектор реактора. Продукты конверсии из реактора по шести трубкам направляются во внутренний канал установки в высокотемпературную струю азота. При смешении этой струи с воздухом на выходе из установки продукты конверсии сгорают.

На стенде для тепловых испытаний ТХР были оборудованы две газоаналитические системы. Первой системой служит система отбора проб в пробоотборные бачки за счет предварительного созданного в них глубокого разряжения. Далее в пробоотборные бачки нагнетается аргон. Анализ состава отобранного газа производится с использованием аттестованного хроматографа.

Второй — эта система непрерывного масс-спектрометрического анализа в течение эксперимента с использованием масс-спектрометра МС7–100. Она является основной, поскольку предоставляет возможность производить анализ газа в термохимическом реакторе непрерывно и непосредственно во время эксперимента, в то время как первая система — контрольная.

Особенности выбранного источника тепла — ЭДП-109М — обуславливают необходимость организации теплозащиты вокруг центрального канала, через который проходит струя азотной плазмы, полученной в плазмотроне. Стенки, образующие центральный канал, являются защищаемыми.

Геометрически центральный канал был выполнен в форме прямоугольника с шириной, значительно превосходящей высоту. Такая конструкция обеспечила возможность не защищать боковые стенки, удаленные от центра потока. Два канала ТХР, в которые подается смесь метана и водяного пара, были размещены около самых теплонапряженных поверхностей. На рис. 2 изображена принципиальная схема экспериментального ТХР. На входе в ТХР был размещен смеситель с тангенциальной подачей компонентов, обеспечивающей их смешение и распределение между верхним и нижним каналами.

Корпус модельного реактора изготовлен из сплава ХН78Т, у которого температура начала окисления в воздушной среде составляет 1150 °С, а рекомендуемая максимальная

температура применения в течение длительного времени (до 10000 ч) — 1100 °С. Этот сплав используется для изготовления жаровых труб высокотемпературных камер сгорания турбореактивных двигателей, работающих при температурах 1000–1100 °С.

Другим важным достоинством сплава ХН78Т заключается в том, что состав его компонентов близок к составу нихрома марки Х20Н80, который используется в качестве материала катализатора. Это позволяет после специальной обработки внутренних поверхностей реактора осуществлять паровую конверсию углеводородов непосредственно на его стенке.

Для увеличения степени конверсии углеводородного топлива были созданы специальные каркасные катализаторы. Полученный катализатор представляет собой спрессованную нихромовую проволоку, вытравленную для повышения удельной поверхности и активированную в кислородной атмосфере в муфельной печи. Более подробное описание экспериментального реактора можно найти в [6, 7].

Экспериментальное исследование

Проведение экспериментов имело целью определить режимы работы ТХР теплозащиты с максимальной степенью конверсии при условии снятия значительных тепловых потоков. Кроме того, проверялась применимость выбранного материала корпуса ТХР и анализировалась работа новых катализаторов.

Входными параметрами эксперимента были: расходы водяного пара и метана в реакторе; расход азота в плазмотроне; температура смеси паров воды и метана на входе в реактор; мощность плазмотрона. А основные непосредственно измеряемые выходные параметры — температура охлаждаемой стенки реактора, определяемая в шести точках, и химический состав смеси, отбираемый в точках пробоотбора.

На основании измеренных величин входных и выходных параметров были получены величина теплового потока, скорость течения смеси и степень конверсии метана. Всего было проведено четыре продолжительных эксперимента, в ходе которых исследовано 11 стационарных режимов. Во всех экспериментах расход азота поддерживался на уровне 9,1 г/с, а температура смеси водяного пара и метана на входе в реактор

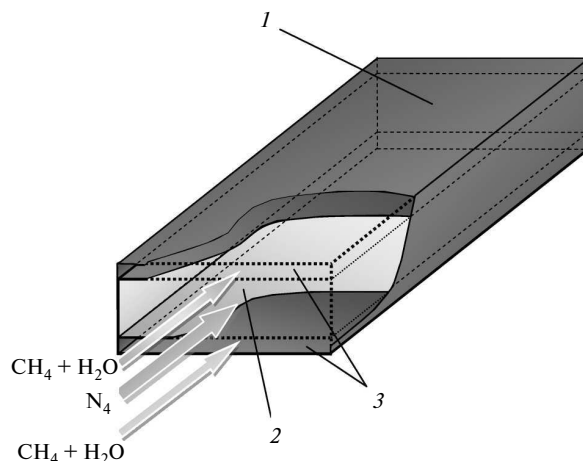


Рис. 2. Схема экспериментального ТХР:
1 — внешняя поверхность; 2 — центральный канал;
3 — каналы ТХР

была близкой к 600 К. Остальные параметры экспериментов указаны в табл. 1. В первом эксперименте в каналы ТХР не был установлен каркасный катализатор.

Математическое моделирование

Полученных экспериментальных данных недостаточно для полного описания изучаемых процессов теплообмена, поскольку не все физические величины могли быть измерены в ходе эксперимента. Для определения таких величин необходимо воспользоваться аппаратом математического моделирования. Основываясь на полученных в ходе эксперимента данных, можно составить модель, описывающую соотношение искомых величин в условиях протекавшего эксперимента.

В первую очередь необходимо определить величины удельного теплового потока, исходящего от азотной плазмы и поглощаемого в ТХР. Поглощаемый удельный тепловой поток — основной критерий применимости паровой конверсии в элементах активной тепловой защиты. Далее необходимо рассчитать степень конверсии и оценить относительную эффективность работы ТХР в реализованных режимах.

Была разработана двумерная модель, состоящая из двух частей. Первая часть модели (модель центрального канала) описывает взаимодействие струи азотной плазмы и металлической стенки ТХР, для которой известна измеренная температура; в этой части определяются величины удельного теплового потока. Вторая часть

Таблица 1

Основные параметры экспериментов

Режим	Расход водяного пара, г/с	Расход метана, г/с	Мощность плазмотрона, кВт	Средняя температура стенки, К
1.1	0,27	0,13	25,1	1277
2.1	0,3	0,13	14,8	838
2.2	0,29	0,14	39,5	1255
2.3	1	0,51	49,8	1514
3.1	0,26	0,12	16,3	1011
3.2	0,26	0,13	29,9	1330
4.1	0,26	0,13	26,1	1247
4.2	0,44	0,33	30,1	1250
4.3	0,44	0,54	30	1271
4.4	0,45	0,53	51	1453
4.5	0,45	0,54	60,2	1502

модели (модель канала ТХР) описывает процессы, происходящие непосредственно внутри ТХР, а именно нагрев и химические преобразования потока компонентов; с ее помощью определяется скорость и состав реагирующей смеси, причем расчет производится на основании вычисленного удельного теплового потока.

Математические расчеты велись в среде конечно-разностного моделирования Comsol 4.3a. В первой части модели эксперимента использовался модуль «Conjugate Heat Transfer. Во второй части модели использовались модули: «Darcy's Flow», «Heat Transfer in Fluids» и «Transport of Concentrated Species».

Результаты исследования

Зависимость удельного теплового потока, поступающего в ТХР, от температуры охлаждаемой стенки показана на рис. 3. Важный параметр изучаемого процесса — удельное теплотеплопоглощение. Оно определяется как величина тепловой энергии, поглощенной единицей массы реагирующей смеси, и в стационарном режиме рассчитывалось по следующей формуле:

$$\omega = \frac{\int_0^l q(x) dx}{G},$$

где $q(x)$, Вт/м² — удельный тепловой поток на расстоянии x , м, от начала реактора; l , м — длина реактора; G , кг/с, массовый расход компонентов.

Для всех пройденных стационарных режимов была определена величина удельного теплопоглощения как функция теплового потока. Эта зависимость показана на рис. 4.

Как видно, в некоторых экспериментах величина удельного теплопоглощения достигала 3 МДж/кг. Однако в ряде экспериментов с высокой степенью конверсии удельное теплопоглощение было менее 2 МДж/кг. Поскольку теоретический максимум величины удельного теплопоглощения для смеси метана и воды со стехиометрическим соотношением компонент составляет примерно 10 МДж/кг, включая химический хладоресурс около 6 МДж/кг [8], то можно утверждать, что в режимах с высокой степенью конверсии непосредственно в зоне охлаждения реализуется от 17 до 63 % общего хладоресурса.

В табл. 2 сравниваются величина удельного теплопоглощения, достигнутая в эксперименте, и максимальное теоретическое теплопоглощение использовавшихся нестехиометрических смесей (их хладоресурс). Как видно по данным таблицы, степень использования хладоресурса для охлаждения стенки в разных экспериментах сильно менялась, при этом степень конверсии оставалась высокой в режимах с высокой температурой стенки.

Проведенные эксперименты позволили оценить работоспособность реактора как элемента теплозащиты в режимах с высокими степенями конверсии. Были достигнуты удельное теплопоглощение 3–3,5 МДж/кг внутри реактора и степень использования хладоресурса внутри ТХР 63 %.

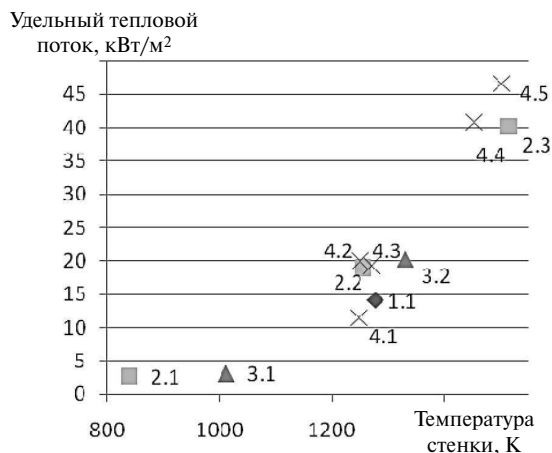


Рис. 3. Зависимость удельного теплового потока от температуры стенки
 (♦ – 1.1; ■ – 2.1, 2.2, 2.3; ▲ – 3.1., 3.2.;
 × – 4.1., 4.2, 4.3, 4.4, 4.5)

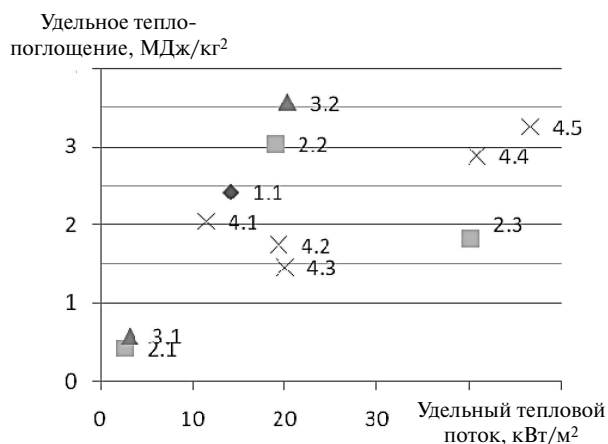


Рис. 4. Зависимость удельного теплопоглощения от удельного теплового потока
 (♦ – 1.1; ■ – 2.1, 2.2, 2.3; ▲ – 3.1., 3.2.;
 × – 4.1., 4.2, 4.3, 4.4, 4.5)

Таблица 2

Удельное теплопоглощение, степень использования хладоресурса и степень конверсии.

Режим	Удельное теплопоглощение (эксперимент), МДж/кг	Максимальное теоретическое удельное теплопоглощение, МДж/кг	Степень использования хладоресурса внутри ТХР, %	Степень конверсии
1.1	2,42	5,53	44	0,43
2.1	0,42	5,14	8	0,11
2.2	3,02	5,54	55	0,98
2.3	1,82	5,74	32	0,98
3.1	0,57	5,37	11	0,14
3.2	3,56	5,67	63	0,98
4.1	2,04	5,96	34	0,98
4.2	1,74	7,39	24	0,86
4.3	1,45	8,81	17	0,99
4.4	2,88	9,01	32	0,99
4.5	3,25	9,19	35	0,99

Выбранный материал проработал более 100 минут при температуре более 1000 °С. На нем не было замечено никаких механических изменений и не выявлено образование окалины.

В режимах 4.4 и 4.5 с расходом метана большим, чем расход водяного пара, удельное теплопоглощение (соответственно 2,88 и 3,25 МДж/кг) было выше, чем в режиме 2.3 (1,82 МДж/кг) с расходом водяного пара в два раза большим,

чем расход метана. При этом степени использования хладоресурса и степени конверсии в них были близки.

Созданный катализатор позволил осуществить высокие степени конверсии. Сравнивая близкие режимы 1.1 и 4.1, можно увидеть, что не только возросла степень конверсии (соответственно 0,43 и 0,98), но и снизилась температура охлаждаемой стенки (1277 и 1247 К соответственно).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бальмина Р.В., Губанов А.А., Иванькин М.А., Лапинский Д.А. Состояние и перспективы разработки гиперзвукового вооружения // *Новости зарубежной науки и техники*. Серия: Авиационная и ракетная техника. 2012. Вып. 1–2. С. 1821–1822.
2. Lander H., Nixon A. Endothermic fuels for hypersonic vehicles // *AIAA* 68–997. P. 1–12.
3. Веселов В.В., Рафал А.Н. Состав газа конверсии углеводородов. Киев: Наукова думка, 1976.
4. Kuranov A., Korabelnikov A. Hypersonic technologies of atmospheric cruise flight under AJAX concept // *AIAA*. P. 2008–2524.
5. Электродуговые плазмотроны. Рекламный проспект / Под ред. М.Ф. Жукова; Акад. наук СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т теплофизики. Новосибирск: Наука, 1975. 44 с.
6. Куранов А.Л., Корабельников А.В., Михайлов А.М. Экспериментальные исследования паровой конверсии метана в термохимическом реакторе // *Международный симпозиум «Термохимические процессы в плазменной аэродинамике»*: Сб. докл. Санкт-Петербург, 2012.
7. Куранов А.Л., Корабельников А.В., Михайлов А.М. Применение паровой конверсии углеводородного топлива в энергетических установках гиперзвуковых летательных аппаратов // *XVI Междунар. конф. по методам аэрофизических исследований (ICMAR 2012)*. Казань, 2012.
8. Kuranov A.L., Korabelnikov A.V., Mikhaylov A.M. Thermal protection and hydrogen production on board of the hypersonic vehicle // *18th AIAA/3AF International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference Tours*.— France. 2012

REFERENCES

1. Bal'mina R.V., Gubanov A.A., Ivan'kin M.A., Lapinskiy D.A. Sostojanie i perspektivy razrabotki giperzvukovogo vooruzhenija. *Novosti zarubezhnoj nauki i tehniki. Serija: aviacionnaja i raketnaja tehniki*. 2012. Vol. 1–2. S. 1821–1822. (rus.)
2. Lander H., Nixon A. Endothermic fuels for hypersonic vehicles. *AIAA* 68–997.— P. 1–12.
3. Veselov V.V., Rafal A.N. Sostav gaza konversii uglevodorodov. Kiev: Naukova dumka, 1976. (rus.)
4. Kuranov A., Korabelnikov A. Hypersonic technologies of atmospheric cruise flight under AJAX concept. *AIAA* P. 2008–2524.
5. Jelektrodugovye plazmotrony. Reklamnyj prospekt / Pod red. M.F. Zhukova; Akad. nauk SSSR. Sib. otdnie. In-t teplofiziki. Novosibirsk: Nauka, 1975. 44 s. (rus.)
6. Kuranov A.L., Korabelnikov A.V., Mikhaylov A.M. Experimental study of steam reforming of methane in the thermochemical reactor. *International Symposium on «Thermochemical processes in plasma aerodynamics»*. St. Petersburg. Russia. 2012. (rus.)
7. Kuranov A.L., Korabelnikov A.V., Mikhaylov A.M. Application of steam conversion of hydrocarbonic fuel in hypersonic aircraft power installations. *International Conference on the Methods of aerophysical research (ICMAR)*. Kazan. Russia. 2012. (rus.)
8. Kuranov A.L., Korabelnikov A.V., Mikhaylov A.M. Thermal protection and hydrogen production on board of the hypersonic vehicle. *18th AIAA/3AF International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*. Tours. France. 2012

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУРАНОВ Александр Леонидович — доктор технических наук профессор кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, генеральный директор и главный конструктор ОАО «Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем» ХК «Ленинец»; 196066, г. Санкт-Петербург, Московский проспект 212; e-mail: mail@hypersonics.ru

КОРАБЕЛЬНИКОВ Алексей Васильевич — кандидат технических наук доцент кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, начальник НИО-1 ОАО «Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем» ХК «Ленинец»; 196066, г. Санкт-Петербург, Московский проспект 212; e-mail: mail@hypersonics.ru

МИХАЙЛОВ Андрей Михайлович — аспирант кафедры систем и технологий управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, старший инженер ОАО «Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем» ХК «Ленинец»; 196066, г. Санкт-Петербург, Московский проспект 212; e-mail: Mikhaylov@hypersonics.ru

AUTHORS

KURANOV Aleksandr L. — Hypersonic Systems Research Institute of Leninetz HC; 196066, Moskovsky prospekt 212, St. Petersburg, Russia; e-mail: mail@hypersonics.ru

KORABELNIKOV Aleksey V. — Hypersonic Systems Research Institute of Leninetz HC; 196066, Moskovsky prospekt 212, St. Petersburg, Russia; e-mail: mail@hypersonics.ru

MIKHAYLOV Andrey M. — Hypersonic Systems Research Institute of Leninetz HC; 196066, Moskovsky prospekt 212, St. Petersburg, Russia; e-mail: Mikhaylov@hypersonics.ru