

ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЙ ДВУХРЕЖИМНЫЙ МАРШЕВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

 *В.Н. Гусев, В.И. Семенов, И.Г. Стороженко*

НПО Энергомаш

В данной статье был проведен анализ нескольких возможных схем трехкомпонентных двухрежимных двигателей, который показал, что наиболее энергетически эффективной является схема двигателя с использованием окислительного и восстановительного газогенераторов (схема «газ-газ-жидкость»).

На основе огневых испытаний экспериментального стендового трехкомпонентного двигателя была обоснована возможность реализации данной схемы и как следствие – открытие новых перспектив для дальнейшего совершенствования двигателей.

THREE-PROPELLANT DUAL-MODE PROPULSION ENGINE FOR THE NEXT
GENERATION AEROSPACE SYSTEMS AND LAUNCH VEHICLES

 *V.N. Gusev, V.I. Semenov, I.G. Storozhenko*

NPO Energomash

This article presents the analysis of several potential designs of three-propellant dual-mode engines, which shows that the most power-effective design is the one which utilizes oxidizing and regenerating gas generators (“gas-gas-liquid” configuration).

Based on hot fire tests of experimental test three-propellant engine, the possibility was justified for this design to be realized and, subsequently, for new prospects of the further engine development to be discovered.



В.Н. Гусев, НПО Энергомаш, инженер-конструктор, высшее образование, профессиональный опыт – 3 года, основной круг научных интересов – разработка и проработка новых схем ракетных двигателей, конструирование новых двигателей, усовершенствование существующих ракетных двигателей.



И.Г. Стороженко, НПО Энергомаш, заместитель начальника отдела, высшее образование, кандидат технических наук, профессиональный опыт – 46 лет, основной круг научных интересов – разработка и проработка новых схем ракетных двигателей, конструирование новых двигателей, усовершенствование существующих ракетных двигателей, количество публикаций – 20.



В.И. Семенов, НПО Энергомаш, начальник отдела, высшее образование, доктор технических наук, лауреат Государственной премии РФ, профессиональный опыт – 47 лет, основной круг научных интересов – разработка и проработка новых схем ракетных двигателей, конструирование новых двигателей,

усовершенствование существующих ракетных двигателей, количество публикаций – 25.

1. Введение

В настоящее время в ракетно-космической технике применяются двухкомпонентные ЖРД, использующие в качестве окислителя жидкий кислород и разделяющиеся по виду используемого горючего: либо плотное углеводородное горючее (главным образом, керосин), либо высокоэнергетический, но обладающий малой плотностью жидкий водород. Плотный тип горючего используется, как правило, на первых ступенях ракет-носителей (РН), водород – на последующих ступенях РН.

Наибольший эффект в части выводимых масс полезного груза (ПГ) достигается при оптимизации сочетания «энергетическая эффективность + плотность» топлива применительно к конкретным характеристикам РН и выводимых ПГ.

Указанный эффект может быть достигнут при использовании в одной ступени двух двигательных установок, одна из которых работает на плотных компонентах (например, «керосин+кислород»), а вторая использует в качестве топлива «кислород+водород».

Таким образом разработаны существующие РН «Энергия», «Спейс Шаттл», имеющие «пакетную» схему компоновки первых и вторых ступеней. Двигательная установка указанных РН на начальном участке полета работает с использованием топлива «кислород + керосин + водород», а после отделения первых ступеней – на компонентах «кислород + водород». Такой режим работы двигательной установки был определен разработчиками РН как наиболее оптимальный.

Достижения в разработке двигателей семейства РД170 позволили на их основе найти решение для разработки двигателей нового класса – трехкомпонентных многорежимных двигателей, использование которых наиболее оптимально применительно к одноступенчатым РН многократного использования и аэрокосмическим системам. Данные двигатели на первом этапе полета (режим максимальной тяги) работают на трехкомпонентном топливе «жидкий кислород + керосин + жидкий водород», при этом доля водорода может составлять 3...6 % от общего массового расхода топлива. Добавка водорода существенно увеличивает удельный импульс тяги в пустоте: например, у двигателей типа РД170 – с 337 с до ≈ 410 с, что и придает данному классу двигателей новое, более совершенное качество. На последующих этапах полета (с меньшей тягой) двигатель переходит на работу на более энергетически выгодный режим на компонентах кислород + водород (с удельным импульсом ≈ 460 с).

В процессе проектных разработок было показано, что наибольший эффект достигается, когда на первом режиме организуется полное смешивание и сгорание в единой камере трехкомпонентного топлива, а далее камера переводится на двухкомпонентный режим.

2. Описание наиболее эффективных схем реализации трехкомпонентных двухрежимных двигателей

Принципиальная схема трехкомпонентного двухрежимного двигателя является основополагающим фактором, определяющим энергетические характеристики двигателя, напряженность и массовые характеристики систем и двигателя в целом, его надежность и работоспособность.

Ниже рассмотрено несколько возможных схем таких двигателей. Внимание было уделено сопоставлению окислительной и восстановительной схем и схемы «газ-газ-жидкость».

Окислительная схема основана на дожигании в камере окислительного генераторного газа, используемого для привода турбин ТНА; восстановительная схема – на дожигании в камере восстановительного генераторного газа, который также используется для привода турбин ТНА. В схеме «газ-газ-жидкость» используются для приводов турбин ТНА окислительный и восстановительный газы, получающиеся в соответствующих газогенераторах. Подобная схема обеспечивает работу двигателя при любой доле водорода в массовом расходе на первом режиме; при этом существенно уменьшаются по сравнению с окислительной и восстановительной схемами перепады давления и температуры газов на турбинах. Эти особенности схемы позволяют в настоящее время рассматривать ее как одну из наиболее перспективных в плане дальнейших разработок трехкомпонентных двигателей.

В данной статье представлены первые результаты проработок по данной схеме.

2.1. Схема «газ-газ-жидкость»

На рис.1 представлена принципиальная схема трехкомпонентного двигателя, работающего по схеме «газ-газ-жидкость» в варианте с отдельными турбо-насосными агрегатами. Подача компонентов топлива в камеру и газогенераторы осуществляется с помощью трех бустерных (БНА) и двух основных турбо-насосных агрегатов (ТНА), один из которых обеспечивает подачу водорода, другой – кислорода и керосина. В двигателе используются окислительный и восстановительный газогенераторы. Турбина ТНА для привода насосов кислорода и керосина работает на окислительном газе, который далее направляется в смесительное устройство камеры. Турбина ТНА с насосными ступенями водорода работает на восстановительном газе, который также направляется в смесительное устройство камеры. Туда же на первом режиме направляется керосин.

При работе двигателя на режиме I и II в качестве горючего в обоих газогенераторах используется водород.

2.2. Окислительная схема

Для сравнения на рис.2 представлена принципиальная схема трехкомпонентного двигателя, работающего по окислительной схеме.

Подача компонентов топлива в камеру и газогенераторы осуществляется с помощью аналогичных трех бустерных насосных агрегатов (БНА) и двух турбонасосных агрегатов (ТНА), один из которых обеспечивает подачу водорода, другой – кислорода и керосина. Турбины ТНА приводятся окислительным газом, вырабатываемым в газогенераторах (отдельный газогенератор для каждого ТНА). При работе двигателя на режиме I и II в качестве горючего в обоих газогенераторах используется керосин.

2.3. Восстановительная схема

На рис.3 представлена принципиальная схема трехкомпонентного двигателя, работающего по восстановительной схеме.

Подача компонентов топлива в камеру и газогенераторы осуществляется с помощью трех бустерных (БНА) и двух основных турбонасосных агрегатов (ТНА), один из которых обеспечивает подачу водорода, другой – кислорода и керосина. В данной схеме приводы турбин осуществляются восстановительным газом, вырабатываемым в газогенераторах (отдельный газогенератор для каждого ТНА). При работе двигателя на режиме I и II в качестве горючего в обоих газогенераторах используется водород.

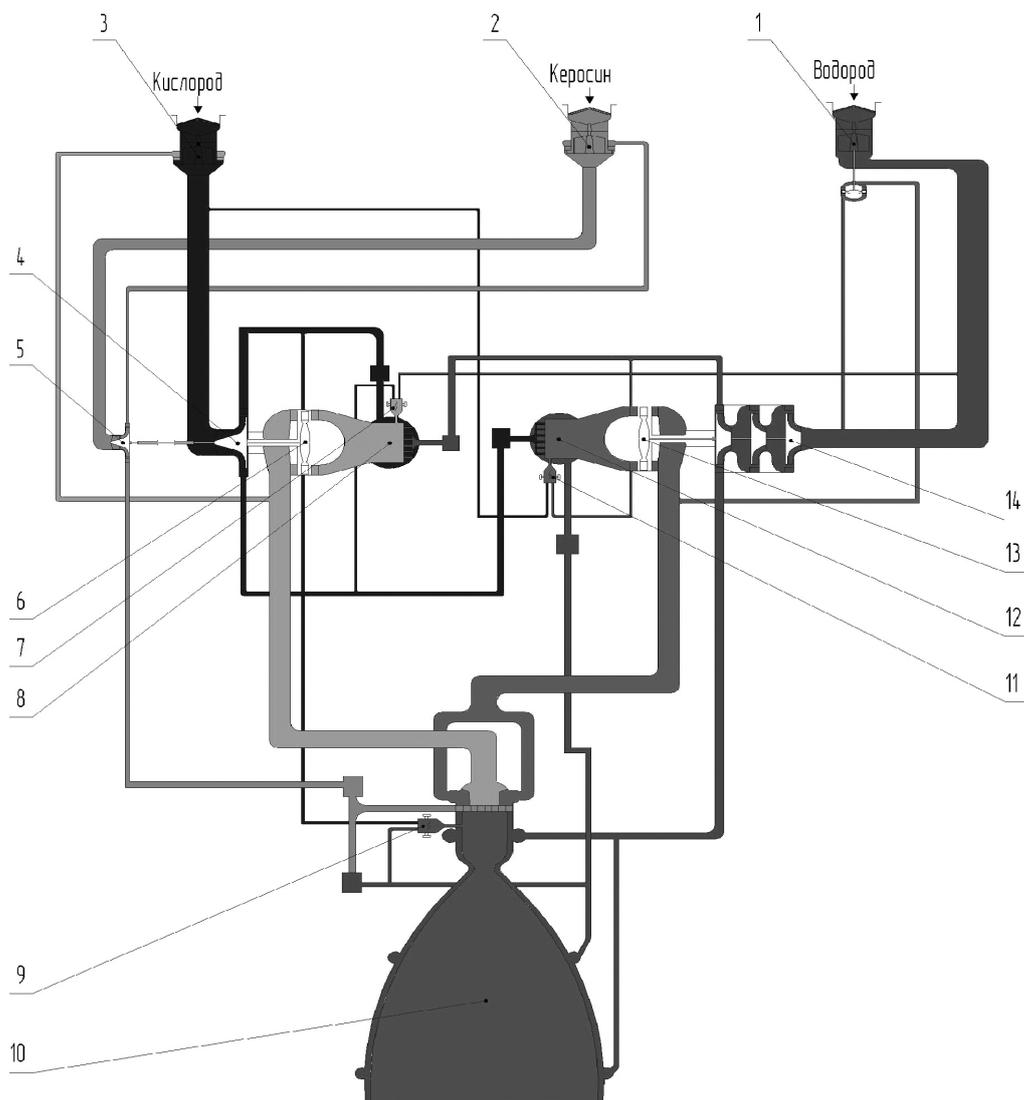


Рис. 1. Схема «газ-газ-жидкость»:

Fig. 1. "Gas-gas-liquid" configuration:

- 1 – бустерный насосный агрегат водорода
- 2 – бустерный насосный агрегат керосина
- 3 – бустерный насосный агрегат кислорода
- 4 – насос кислорода
- 5 – насос керосина
- 6 – рабочее колесо турбины окислительного газогенератора

- 7, 9, 11 – зажигательное устройство
- 8 – окислительный газогенератор
- 10 – камера
- 12 – восстановительный газогенератор
- 13 – рабочее колесо турбины восстановительного газогенератора
- 14 – насос водорода

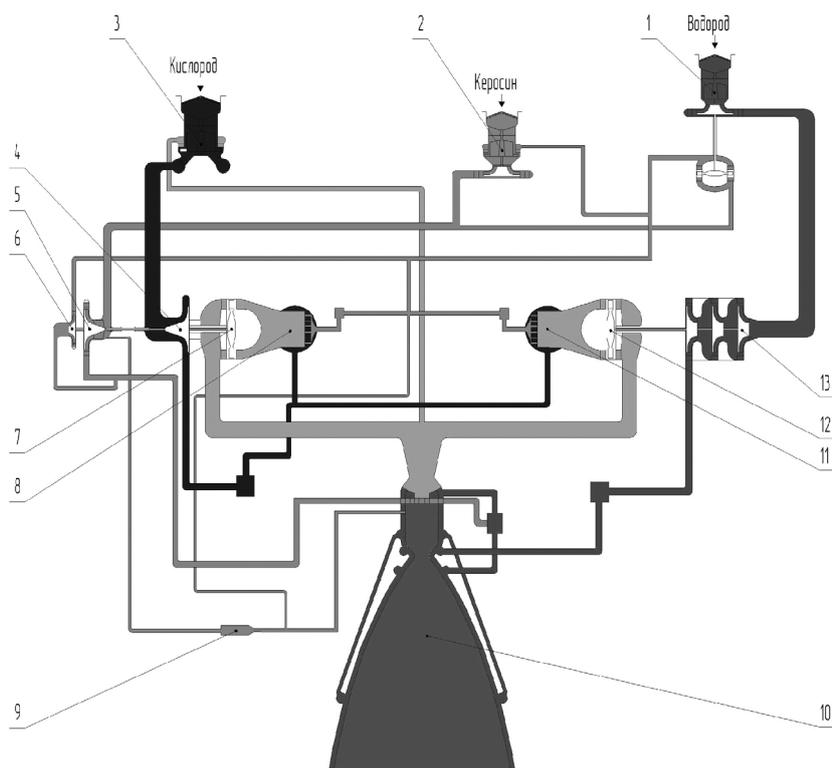


Рис. 2. Окислительная схема:
Fig. 2. Oxidizing configuration:

- 1 – бустерный насосный агрегат водорода
- 2 – бустерный насосный агрегат керосина
- 3 – бустерный насосный агрегат кислорода
- 4 – насос кислорода
- 5 – камерная ступень насоса керосина
- 6 – газогенераторная ступень насоса керосина
- 7, 12 – рабочее колесо турбины
- 8, 11 – окислительный газогенератор
- 9 – ампула с пусковым горючим
- 10 – камера
- 13 – насос водорода

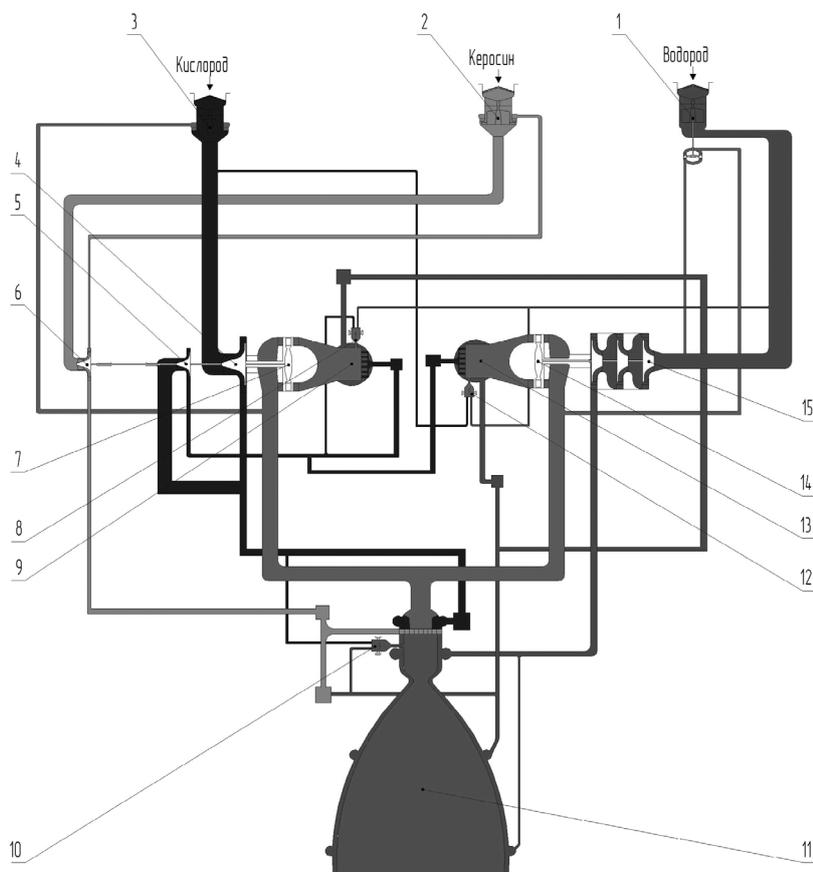


Рис. 3. Восстановительная схема:
Fig. 3. Regenerating configuration:

- 1 – бустерный насосный агрегат водорода
- 2 – бустерный насосный агрегат керосина
- 3 – бустерный насосный агрегат кислорода
- 4 – камерная ступень насоса кислорода
- 5 – газогенераторная ступень насоса кислорода
- 6 – насос керосина
- 7, 14 – рабочее колесо турбины
- 8, 10, 12 – устройство воспламенения компонентов топлива
- 9, 13 – восстановительный газогенератор
- 11 – камера
- 15 – насос водорода

3. Энергетические характеристики представленных двигателей

В таблице 1 представлены результаты расчетов энергетической увязки параметров трех вышеописанных схем трехкомпонентного двухрежимного двигателя применительно к массовой доле водорода на первом режиме 6 %.

Таблица 1

Схема двигателя	Восстановительная	Окислительная	«газ-газ-жидкость»		
I режим					
Давление в камере, кгс/см ²	250	250	250	300	
Удельный импульс в пустоте, с	405,96	405,96	405,96	409	
Напоры насосов, кгс/см ²	O ₂ 1ст/2ст	257,5/396	571	569	630
	H ₂	646	356	597	686
	РГ-1 1ст/2ст	260	260/399	260	310
Степень понижения давления на турбине	ТНО	2,004	2,034	1,861	1,824
	ТНВ	2,022	2,008	1,748	1,752
Температура газа в газогенераторе, К	ТНО	802	913	584	671
	ТНВ	863	842	738	853
II режим					
Давление в камере, кгс/см ²	102	103	102	123	
Удельный импульс в пустоте, с	452,85	448,02	452,85	456,21	
Напоры насосов, кгс/см ²	O ₂ 1ст/2ст	117/123	203	232	245
	H ₂	241	228	231	262
	РГ-1 1ст/2ст	—	113/172	—	—
Степень понижения давления на турбине	ТНО	1,235	1,256	1,216	1,226
	ТНВ	1,372	1,237	1,283	1,303
Температура газа в газогенераторе, К	ТНО	719	807	671	684
	ТНВ	581	771	591	631

Представленные результаты показывают, что схема «газ-газ-жидкость» предоставляет значительно большие энергетические возможности по сравнению с традиционно освоенными схемами ЖРД.

Значение давлений в камере выбирались на основе освоенных в настоящее время.

Видно, что для реализации первых двух схем уже при трансзвуковых режимах течения в проточной части турбины реализуются предельные температуры газа по прочностным характеристикам материалов турбины, что делает их наиболее энергетически напряженными. В то время как в схеме «газ-газ-жидкость» при том же давлении в камере температура газа существенно ниже. По этому показателю схема «газ-газ-жидкость» является более перспективной и энергетически более эффективной по возможности увеличения давления в камере применительно к маршевому двигателю для аэрокосмических систем и ракет-носителей нового поколения.

4. Пример возможности реализации трехкомпонентного двухрежимного двигателя

Опыт, полученный при создании двигателей типа РД170, позволил НПО Энергомаш разработать такую конструкцию трехкомпонентного двухрежимного двигателя, которая позволяет приступить непосредственно к опытно-конструкторской отработке основных систем, агрегатов и двигателя в целом. Одной из основных особенностей является такая организация процесса в камере сгорания, при которой на первом режиме обеспечивается смешение и последующее сгорание трех компонентов.

Данное решение позволяет выполнять камеры и сопла по традиционной схеме и использовать освоенную технологию их изготовления; по-новому конструируется смесительная головка камеры.

В таблице 2 представлены основные технические особенности такого двигателя.

Таблица 2

Параметр	I режим	II режим
Номинальное давление в камере, кгс/см ²	300	126
Тяга у Земли, тс	182	-
Тяга в пустоте, тс	204	81
Удельный импульс у Земли, с	330,4	-
Удельный импульс в пустоте, с	415	460
Массовая доля компонентов в топливе, %		
– кислород	81,4	86
– водород	6	14
– керосин РГ-1	12,6	-
Номинальное среднее давление в выходном сечении сопла, кгс/см ²	0,20	0,07
Номинальное значение внутреннего диаметра среза сопла, мм	2300	

5. Подтверждение возможности реализации эффективного смесеобразования в камере двигателя

Одной из важнейших задач разработки трехкомпонентного двухрежимного двигателя является создание камеры со смесительной головкой, обеспечивающей высокую эффективность процесса смешения и горения трехкомпонентного топлива с последующим переходом на двухкомпонентный режим.

Важным этапом разработки подобного двигателя является экспериментальное исследование и подтверждение высоких энергетических характеристик этих двигателей. С этой целью в НПО Энергомаш был разработан экспериментальный трехкомпонентный двигатель с тягой у Земли 6–8 тонн (рис. 4), состоящий из камеры сгорания, работающей на трехкомпонентном топливе с последующим переходом на двухкомпонентный (кислород – водород) режим, окислительного газогенератора, агрегатов автоматики, обеспечивающих запуск, изменение режимов работы, останов двигателя, и других присущих двигателю агрегатов. Подача компонентов топлива с требуемым давлением в камеру двигателя обеспечивается стендовой системой.

В смесительной головке камеры используются смесительные элементы (форсунок), разрабатываемые для камеры трехкомпонентного ЖРД с тягой на первом режиме 200 тс. В камере экспериментального двигателя смесительная головка содержит 19 форсунок. По мнению разработчиков, отработка процесса в камере с подобной смесительной головкой практически решает основные проблемы организации процесса в камерах с большим числом форсунок.

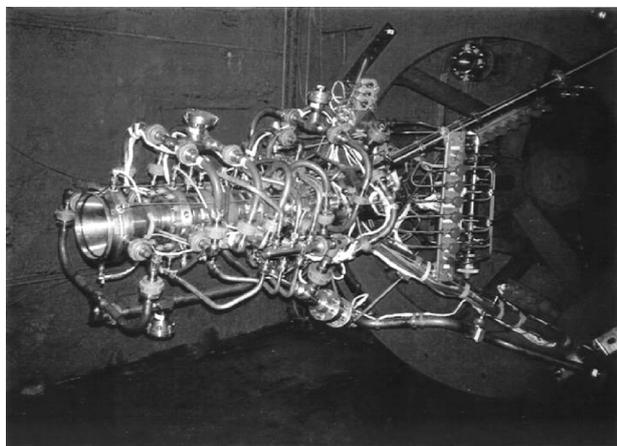


Рис. 4. Экспериментальный трехкомпонентный двигатель
Fig. 4. Experimental three-propellant engine

Ниже представлены результаты проведенных впервые в мире испытаний стендовых трехкомпонентных двигателей.

- Испытания экспериментальных двигателей проведены на стенде В1-А в НИИХМ. В период с 29.02.93 г. по 05.03.98 г. проведено 43 огневых испытания стендовых двигателей на 9 вновь изготовленных экземплярах двигателей и 9 переборочных:
 - 4 испытания на двухкомпонентном режиме O_2+PG-1 при давлении в камере ≈ 120 кгс/см²;

- 11 испытаний на двухкомпонентном режиме O_2+H_2 при давлении в камере ≈ 120 кгс/см²;
- 14 испытаний на трехкомпонентном режиме $O_2+PG-1+H_2$ при давлении в камере ≈ 120 кгс/см²;
- 8 испытаний на трехкомпонентном режиме $O_2+PG-1+H_2$ при давлении в камере ≈ 200 кгс/см²;
- 4 испытания на трехкомпонентном режиме при давлении в камере ≈ 120 кгс/см² и с переходом на двухкомпонентный режим;
- 1 испытание завершилось ложным выключением на запуск;
- 1 испытание по отработке запуска газогенератора.
- Испытания на трехкомпонентном топливе проведены в диапазоне:
 - давления в камере 114...220 кгс/см²;
 - изменения процентного содержания водорода в топливе от 2 % до 6,7 %;
 - температуры окислительного газа 522...1010 К;
 - работы на режиме 5...103 с.

Результаты проведенных огневых испытаний стендового трехкомпонентного двигателя на трехкомпонентном топливе показали высокую эффективность процесса смешения и горения трехкомпонентного топлива в одной камере с полнотой сгорания $\varphi_k = 0,999$.

Проведенные испытания с использованием камер, имеющих различные варианты смесительных головок (десять вариантов), показали, что в камерах трехкомпонентных двухрежимных двигателей может быть реализован высокоэффективный процесс горения трехкомпонентного топлива с переходом далее на двухкомпонентный режим.

В экспериментальном стендовом двигателе была реализована схема «газ-газ-жидкость», поскольку компоненты топлива кислород и водород подавались в газогенератор и камеру, соответственно, из баков в газовой фазе, а керосин – в жидкой. Тем самым была показана возможность реализации наиболее энергетически эффективной схемы трехкомпонентного двухрежимного двигателя – схемы «газ-газ-жидкость».

6. Выводы

– Анализ различных схем трехкомпонентных двигателей показал, что наиболее энергетически эффективной является схема двигателя с использованием окислительного и восстановительного газогенераторов (схема «газ-газ-жидкость») с последующим сжиганием окислительного и восстановительного газов в камере сгорания. Данная схема открывает перспективы и для дальнейшего совершенствования двигателей, работающих на компонентах водород – кислород.

– НПО Энергомаш провело на экспериментальном стендовом двигателе отработку смесительных устройств, обеспечивающих устойчивое и высокоэффективное горение компонентов кислород + керосин + водород. Окислитель и водород поступают в камеру в газовой фазе. Результаты подтвердили проектную энергетическую эффективность трехкомпонентных двухрежимных ЖРД.