

Б. И. К а т о р г и н, В. К. Ч в а н о в,
В. И. А р х а н г е л ь с к и й, С. Г. К о н о в а л о в,
В. Н. Х а з о в
(НПО “Энергомаш им. академика В.П. Глушко”)

ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КИСЛОРОДНО-КЕРОСИНОВЫХ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрены кислородно-керосиновые жидкостные ракетные двигатели с замкнутым автономным контуром охлаждения камеры двигателя и приводом турбины турбонасосного агрегата. Показана реальная возможность совершенствования характеристик двигателя в направлении существенного роста его удельных показателей и повышения надежности.

Широко применяемая “замкнутая” схема жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) с окислительной системой газогенерации позволила специалистам НПО “Энергомаш им. академика В.П. Глушко” создать двигатели различных уровней тяги, с уникальными характеристиками, определяемыми освоенным уровнем $p_k \sim 270$ кгс/см². Однако сохраняя возможность некоторого улучшения характеристик отдельных узлов, существенно повысить удельные энергомассовые показатели двигателей этой схемы не представляется реальным. К тому же в данном случае остается потенциальная опасность возгорания проточной части турбины в среде высокотемпературного окислительного газа при попадании в поток случайных посторонних частиц.

При разработке кислородно-керосиновых ЖРД логично было бы акцентировать внимание на значительном улучшении характеристик двигателя не за счет дальнейшего “выжимания” возможностей из чрезмерно теплонпряженных агрегатов традиционной схемы, а благодаря радикальным схемным изменениям. В данном направлении специалисты НПО “Энергомаш” ведут проектные проработки в течение нескольких последних лет. Перспективной представляется схема с автономным (замкнутым) контуром привода турбонасосного агрегата (ТНА), упрощенный вариант которой приведен на рис. 1. Здесь окислитель и горючее с небольшими потерями давлений из соответствующих насосов поступают непосредственно в смесительную головку камеры. В качестве рабочего тела турбины ТНА используются “нерасходуемый” компонент, циркулирующий в замкнутом контуре, который последовательно включает в себя следующие элементы: тракт охлаждения камеры, турбину, теплообменник-конденсатор, циркуляцион-

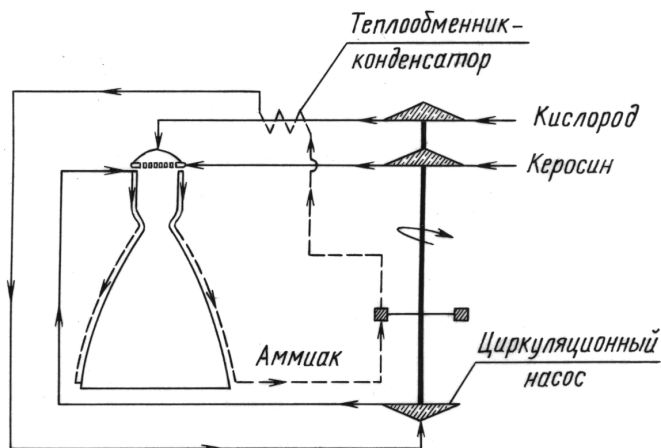


Рис. 1. Принципиальная схема двигателя с замкнутым контуром привода ТНА

ный насос и вновь тракт охлаждения камеры. Таким образом, реализуется так называемый “безгазогенераторный” вариант схемы (например, американский двигатель RL-10), но с выхлопом отработанного турбогаза в теплообменник-конденсатор замкнутого контура, устанавливаемый на линии “холодного” компонента в магистрали жидкого кислорода. Другими словами, здесь реализуется классический вариант паро-жидкостного цикла Ренкина, нашедший широкое практическое применение в паросиловых энергетических установках различного наземного назначения (рис. 2).

Необходимо подчеркнуть, что прообраз подобной схемы в качестве возможного перспективного направления разрабатывался немецким ученым Э. Зенгером и кратко анализировался В.П. Глушко еще в 1947 г. в лекциях на Высших Инженерных Курсах при МВТУ им. Н.Э. Баумана. В рамках именно этой схемы по окончании Курсов в ОКБ-456 в начале 50-х годов был выполнен ряд дипломных проектов. Далее аналогичные проработки выполнялись и в НИИ тепловых процессов (ныне ИЦ им. М.В. Келдыша).

Относительная простота, высокая надежность и эффективность

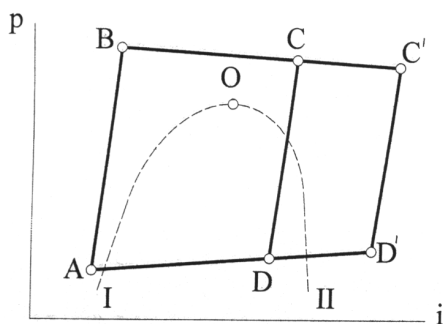


Рис. 2. Структура парожидкостного цикла работы замкнутого контура ЖРД в координатах давление-энтальпия:

О–I — линия кипения; О–II — линия конденсации; О — критическая точка; ABCD — цикл с нагревом за счет теплосъема с камеры; ABC'D' — цикл с дополнительным нагревателем

рассматриваемой схемы могут быть реализованы лишь при правильно выбранном сочетании основных термодинамических параметров замкнутого контура, что в существенной степени определяется правильным выбором его рабочего тела. Рабочее тело замкнутого контура, выполняя функции надежного охладителя высоконапряженной камеры ЖРД, осуществляя далее привод турбины ТНА с высоким уровнем мощности, а затем конденсируясь в теплообменнике для обеспечения стабильной работы центробежного насоса с высоким уровнем нагнетания, должно иметь сложный комплекс свойств. Поэтому практически пригодными к рассмотрению оказываются лишь аммиак (NH_3), вода (H_2O) и метан (CH_4), важнейшей общей чертой которых является низкая молекулярная масса, определяющая возможность реализации большой удельной работы расширения в турбине ТНА.

Несмотря на общеизвестные достоинства воды, возможность использования ее в качестве рабочего тела контура затруднена из-за опасности замерзания, высоких значений критических параметров и большой теплоты конденсации, что определяет повышенную тепловую мощность конденсатора и, соответственно, большие его габаритно-массовые показатели.

При отсутствии опасности замерзания метана низкая температура его конденсации и соответственно малый температурный “напор” в теплообменнике-конденсаторе относительно жидкого кислорода также определяют его слишком большие размеры.

Учитывая приведенные факторы, выбор делают в пользу аммиака, поскольку он, занимая как бы среднее положение между водой и метаном, имеет наиболее благоприятный комплекс необходимых базовых свойств. Перспективны также водоаммиачные смеси, образующие растворы в широком диапазоне составов и характеризующиеся низкими температурами замерзания (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики водоаммиачного раствора

Весовая доля NH_3 в воде	8,75	14,5	21,2	25,9	29,8	31,8	33,2	35,0	38,6	45,1
Температура замерзания, °С	-10	-20	-40	-60	-80	-90	-100	-120	-90	-80

Ввиду особой важности, вопрос термодинамической стабильности чистого аммиака и наиболее перспективного водоаммиачного раствора (35 % вес. NH_3) в условиях температур, давлений и длительности воздействия с учетом конструкционных материалов, был исследован специалистами НПО “Энергомаш” и ИЦ им. М.В. Келдыша. Полу-

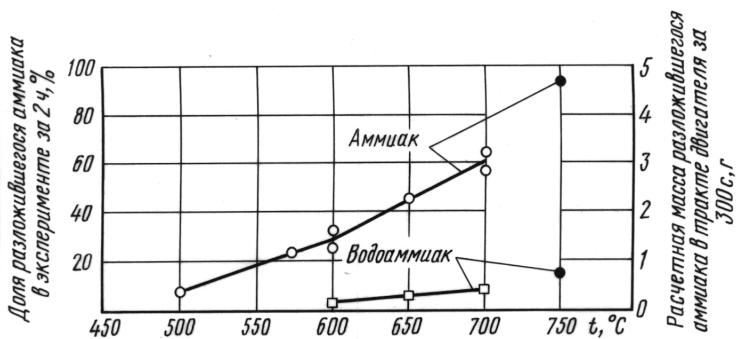


Рис. 3. Степень термодинамического разложения аммиака и водоаммиачной смеси (35 % вес. NH_3) в эксперименте и для условий ЖРД тягой ~ 80 тс

ченные экспериментально-аналитические результаты оказались вполне удовлетворительными. Так, для двигателя тягой ~ 80 тс масса продуктов разложения не выходит за единицы граммов и укладывается в пределы их растворимости в объеме жидкого аммиака в контуре (рис. 3) [1]. Они и были положены в основу энергетических увязок параметров вариантов двигателей. При этом рассматривались двигатели как большой — 100...200 тс, так и малой тяги ~ 8 тс.

Приведенный на рис. 2 рабочий цикл ABCD соответствует двигателю, в котором теплосъем с тракта охлаждения камеры весьма ограниченный и не позволяет реализовать рабочие давления более 100...170 кгс/см². Некоторый эффект получается при использовании известных способов увеличения теплосъема (снижение расхода на завесу, удлинение цилиндрической части камеры, оптимизация обрешетки и т.п.). Тем не менее, соответствующие двигатели могут представлять определенный интерес благодаря относительной простоте и повышенной надежности [2, 3]. В табл. 2 сопоставлены основные характеристики двигателя РД 120.04 традиционного исполнения и эскизной разработки на той же камере и на ту же тягу двигателя с замкнутым контуром привода ТНА. Компонировка такого двигателя с оригинальной конструкцией теплообменника-конденсатора в виде кольцевой обечайки на сопловой части камеры двигателя удачно решает проблему сочетания характерных для цикла Ренкина больших площадей конденсации (десятки квадратных метров) и компактности двигателя в целом. В общем, удалось показать, что штатные параметры — рабочее давление $p_k = 166$ кгс/см² и тяга 77,9 тс — реализуются при снижении примерно в 1,5 раза напоров насосов кислорода и керосина и даже некотором снижении массы двигателя, при меньшей мощности ТНА (на ~ 30 %) и невысокой рабочей температуре нейтрального (что особенно важно) турбогаза (~ 300 °C) [2, 3].

Сравнительные характеристики двигателей

Параметры сравнения	Двигатель традиционной схемы	Двигатель с замкнутым контуром		
		на теплосъеме с камеры	с догревателем	
Давление кислорода, кгс/см ²	358,6	201	350	430
Давление керосина, кгс/см ²	366,5/509,3	227	405	520
Турбогаз:	Кислород 98 %	Нейтральный (аммиак)		
температура, °С	479,6	302	500	500
давление, кгс/см ²	334,4	345	330	350
Камера:				
давление, кгс/см ²	166		300	385
тяга, тс	77,9		150,2	195,9
Удельный импульс, с	297		312,8	318,88
Масса двигателя, кг	1010	930	~1500	~2000

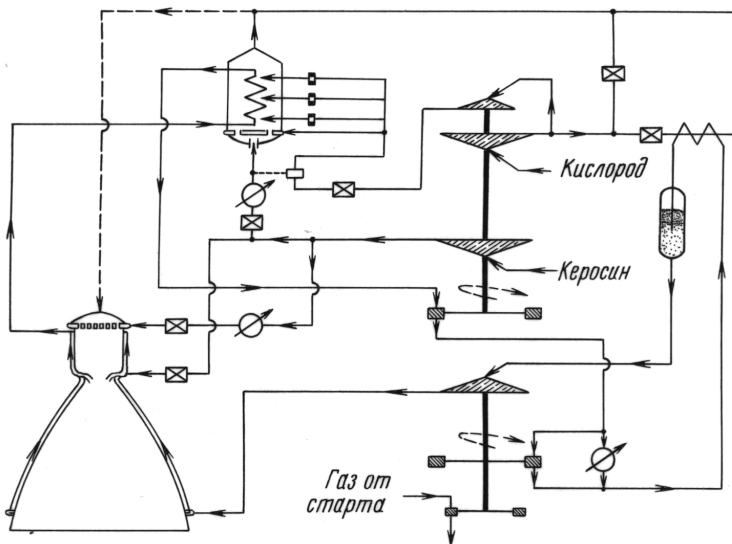


Рис. 4. Принципиальная схема двигателя с замкнутым контуром привода турбины ТНА с дополнительным нагревом рабочего тела в многокаскадном восстановительно-нейтральном газогенераторе

Радикально рабочие параметры (цикл ABCD, см. рис. 2) улучшаются при введении в схему (параллельно либо последовательно тракту охлаждения камеры) дополнительного нагревателя (рис. 4) [1, 4]. Однако использование для этой цели традиционного «окислительного» газогенератора свело бы на нет все преимущества рассматриваемой схемы, а применение восстановительного газогенератора невозможно

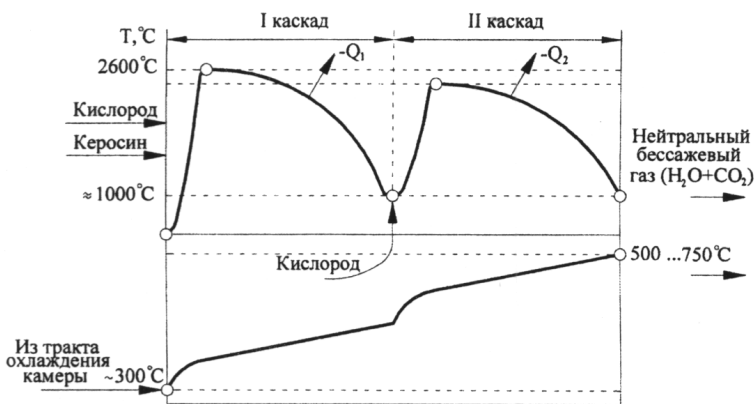


Рис. 5. Схема организации рабочего процесса в кислородно-керосиновом восстановительно-нейтральном газогенераторе со встроенным теплообменником (вариант двухкаскадного сжигания топливной смеси)

из-за образования сажи. Наличие же в данной схеме независимого контура циркуляции с эффективным охладителем позволило реализовать на основе кислородно-керосиновой топливной композиции газогенератор принципиально нового типа — восстановительно-нейтральный, интегрированный с теплообменником-догревателем рабочего тела и энергетически дополняющим контур теплосъема с камеры. В основе устройства этого агрегата — теплопарогенератора — лежит идея (рис. 5) постепенного (многокаскадного) сжигания керосина в области $\alpha \leq 1$ ($K_m \leq 3,4$) с поддержанием (за счет отбора теплоты рабочим телом) температуры продуктов сгорания в некотором температурном коридоре, нижняя граница которого определяется выпадением твердого углерода (сажи), а верхняя — стойкостью теплообменных поверхностей. Практически это диапазон $2500 \dots 1000 \text{ }^\circ\text{C}$, т.е. достаточно широкий для обеспечения интенсивного теплоотвода и эффективного нагрева рабочего тела замкнутого контура с радикальным повышением его адиабатной работоспособности [4, 5]. Рассматривается несколько вариантов конструктивного исполнения и функционирования такого теплопарогенератора [4], ведутся соответствующие расчеты с задачей выхода на температуру турбогаза $500 \dots 750 \text{ }^\circ\text{C}$, при минимуме размеров и массы. В результате, как показали конкретные проработки, удается выйти на уровни рабочих давлений в камере $p_k = 300 \dots 400 \text{ кгс/см}^2$ (см. табл. 2) с увеличением в $2 \dots 2,5$ раза тяги камеры базового варианта и увеличением на $15 \dots 20$ с удельного импульса двигателя. Реально и дальнейшее повышение до $\sim 600 \text{ кгс/см}^2$ давления в камере, ограничиваемое лишь хладоемкостью (конденсационной способностью) кислорода. Существенно, что при этом напоры насосов остаются в пределах освоенных сегодня в серийных двигателях; близки к соответствующим показателям и условия работы огневой стенки.

Выводы. 1. Выполнены проектные проработки, показавшие возможность повышения до 400...500 кгс/см² и выше давления в камере сгорания с соответствующим улучшением удельных энергетических и габаритно-массовых характеристик двигателя при сохранении освоенного уровня тепловых и механических нагрузок и увеличении надежности двигателя из-за отказа от горячего окислительного турбогаза и исключения, тем самым, потенциальной опасности возгорания в проточной части турбины.

2. Выявлены преимущества аммиака, используемого в качестве рабочего тела замкнутого контура ЖРД, для условий рабочих параметров ЖРД — длительности рабочего цикла, используемых конструкционных материалов, температур и давлений. Доказана его достаточная термодинамическая устойчивость.

3. Предложен и разработан принцип устройства многокаскадного восстановительно-нейтрального кислородно-керосинового газогенератора-догревателя, устанавливаемого параллельно или последовательно тракту охлаждения камеры для обеспечения необходимого уровня энергоподпитки замкнутого контура.

4. Разработана конструкция высокоэффективного теплообменника-конденсатора рабочего тела замкнутого контура на проточном жидком кислороде с высокими массово-габаритными характеристиками. Предложена оригинальная конструкция теплообменника-конденсатора в виде кольцевой обечайки на сопловой части камеры двигателя, что удачно решает проблему сочетания характерных для цикла Ренкина больших площадей конденсации и компактности двигателя в целом.

5. Предложенные новые конструкторские решения показывают перспективность ЖРД с автономным замкнутым контуром и создают реальные предпосылки для формирования нового направления развития ЖРД на пути совершенствования двигателей кислородно-керосинового класса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет о НИР НПО “Энергомаш”, ИЦ им. М.В. Келдыша. – Инв. № 3665. – М.; 2002.
2. Патент РФ № 2155273 от 27.08.2000 г. (приоритет от 18.08.1999 г.).
3. Патент РФ № 2190114 от 27.09.2002 г. (приоритет от 30.06.2000 г.).
4. Патентная заявка НПО “Энергомаш” № 2002118569 от 12.07.2002 г.
5. Отчет НИР НПО “Энергомаш”. – № Ш.НТО.726-302-2002.

Статья поступила в редакцию 25.11.2003

Каторгин Борис Иванович. Академик РАН. Генеральный директор и генеральный конструктор ОАО “НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко”.

B.I. Katorgin. Full member of the Russian Academy of Sciences. General Director and General Designer of “NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko” open stock company.

Архангельский Валерий Иванович. Канд. техн. наук, заместитель начальника отдела ОАО “НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко”.

V.I. Arkhangelsky. Ph. D. (Eng.), deputy head of department of “NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko” open stock company.

Чванов Владимир Константинович. Окончил КАИ. Д-р. техн. наук, профессор, первый заместитель Генерального директора и генерального конструктора ОАО “НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко”.

V.K. Chvanov graduated from the Kazan Aviation Institute. D. Sc. (Eng.), professor, first deputy of General Director and General Designer of “NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko” open stock company.

Коновалов С.Г. — начальник отдела ОАО “НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко”.

S.G. Konovalov. Head of department of “NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko” open stock company.

Хазов В.Н. — ведущий конструктор ОАО “НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко”.

V.N. Khazov. Leading designer of “NPO Energomash im. akademika V.P. Glushko” open stock company.

**В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
в 2004 г. вышла в свет книга**

Суржиков С.Т.

Оптические свойства газов и плазмы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 576 с.: 230 ил. (Компьютерные модели физической механики).

ISBN 5-7038-2605-5 (Ч. 2)

ISBN 5-7038-2604-7

Рассмотрены методы компьютерного моделирования спектральных и групповых оптических моделей нагретых газов и низкотемпературной плазмы, которые используются в задачах физической механики, радиационной газовой и плазмодинамики, теплообмена излучением, аэрофизики и при создании авиационно-космической техники. Обсуждаются проблемы автоматизации расчета спектральных оптических свойств. Приведены спектральные оптические свойства газовых смесей, представляющих практический интерес для аэрокосмических приложений.

Для научных сотрудников и инженеров в области теплообмена излучением, физической газовой динамики и физики низкотемпературной плазмы, а также для студентов и аспирантов физико-технических специальностей университетов.

По вопросам приобретения обращаться по тел. 433-82-98;
e-mail: surg@ipmnet.ru