

УДК 621.454.2

## **Проблемные вопросы энергетической увязки параметров жидкостных ракетных двигателей**

**Беляев Е.Н.<sup>1\*</sup>, Воробьев А. Г<sup>1\*\*</sup>., Нассименто Л. Б.<sup>2\*\*\*</sup>,**

**Коломенцев А.И.<sup>1\*\*\*\*</sup>**

*<sup>1</sup>Московский Авиационный Институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*<sup>2</sup>Технологический институт авионавтики, Sao Jose dos Campos, SP, 12228-900, Brazil*

*\*e-mail:belyaev72@rambler.ru*

*\*\*\*e-mail:reitor@ita.br*

*\*\*e-mail:formula1\_av@mail.ru*

*\*\*\*e-mail:kaf202@mai.ru*

### **Аннотация**

Статья посвящена анализу основных вопросов энергетической увязки параметров жидкостных ракетных двигателей. Приводится сравнение экспериментальных и расчетных данных по термодинамическим характеристикам продуктов сгорания топливных пар современных ЖРД. Обосновывается необходимость учёта неидеальности химических реакций при горении топливных пар и реальных свойств газов при определении располагаемой мощности турбин.

**Ключевые слова:** ЖРД, энергетическая увязка, термодинамические характеристики, неидеальность химической реакции

### **Введение**

При разработке новых ЖРД, определения их облика, выбора пневмогидравлической схемы (ПГС) двигателя первоначально проводится энергетическая увязка его параметров. На её основании выбирается ПГС, определяются давления, расходы компонентов топлива, потребные напоры насосов и потребляемая ими мощность, температуры компонентов и рабочих газов и т.п., во всех характерных точках ПГС. Эти полученные параметры двигателя являются исходными данными для проектирования камеры сгорания (КС), газогенератора (ГГ), насосов, турбин, регулирующих органов и т.п.

На начальном этапе, при проведении энергетической увязки параметров учитывается опыт разработки ранее созданных двигателей. Исходя из этого опыта, для вновь разрабатываемого двигателя задаются достижимые значения КПД насосов и турбин, потребные перепады давления для надёжного охлаждения камеры сгорания, распыла форсунками компонентов топлива и работы регулирующих органов и т.д. Давление и коэффициент соотношения компонентов топлива в КС выбирается с учетом получения максимального удельного импульса тяги двигателя, его габаритов и надёжного охлаждения камеры.

Поскольку, на этом этапе, многие параметры ЖРД и его агрегатов принимаются ориентировочно, исходя из опыта предыдущих разработок, поэтому не следует ожидать большой точности в определении некоторых параметров двигателя в характерных точках. Сама процедура энергетической увязки параметров проводится от начала создания нового двигателя до окончания эксплуатации последнего экземпляра, поскольку многие из принимаемых или рассчитанных

параметров должны постоянно уточняться. Среди них следует особо выделить - расчетное определение термодинамических характеристик продуктов сгорания используемой топливной пары, особенно в ГГ, поскольку рабочий процесс в нём протекает при соотношении компонентов топлива, значительно отличающимся от стехиометрического [1], и учет реальных свойств газов при расчете работы турбин [2]. И то и другое может существенным образом изменить энергетический баланс всего двигателя и повлиять на выбор его ПГС.

### **Определение термодинамических характеристик продуктов сгорания**

Расчетному определению термодинамических характеристик продуктов сгорания посвящено много работ и разработано большое количество программ (например, СЕА – разработка NASA, Астра.4/рс – разработка МГТУ им. Н.Э. Баумана, RPA - Alexander Popomarenko и пр.). В этих программах, в качестве допущений принято, что системы находятся в состоянии термодинамического равновесия и нет обмена веществом с окружающей средой, газовая фаза описывается уравнением состояния идеального газа, растворимость газов в жидких и твердых фазах отсутствует, конденсированные вещества образуют однокомпонентные несмешивающиеся фазы и т.д.

В табл. 1 приведено сопоставление рабочих температур в окислительных ГГ двигателей 11Д58М, РД-120 и РД-191 [3] и расчетных температур, полученных по программам СЕА, RPA и Астра.4/рс. Расчеты проведены с учётом температур кислорода и углеводородного горючего, поступающих в ГГ, реализованные на этих двигателях.

## Сопоставление рабочих температур в окислительных ГГ двигателей

Таблица 1

Программа расчета	Двигатель		
	11Д58М	РД-120	РД-191
СЕА	712 К	687 К	774 К
РРА	755 К	747 К	821 К
Астра.4/рс	899 К	967 К	1036 К
Температура по испытаниям	735 К	734,8 К	823 К

Сопоставление показывает что, в реальных условиях температуры окислительного газа в ГГ значительно отличается от расчетных значений, как в меньшую, так и большую сторону. Связано это, как минимум с двумя факторами, во первых с тем, что на сегодняшний день кинетика горения топлив при больших избытках и недостатках окислителя изучена недостаточно [1]. Это же подтверждают и результаты расчетов по выше названным программам. В табл. 2 приведены результаты расчетов при давлении в зоне горения 20 МПа, температурах кислорода и углеводородного горючего, соответственно 100 К и 293 К и при разных коэффициентах соотношения компонентов топлива  $k_m$ .

## Результаты расчетов температур

Таблица 2

Программа расчета	$k_m$	
	2,6	60
СЕА	3825 К	614.5 К
РРА	3831 °К	655,3 К
Астра.4/рс	3904 К	879.9 К

Расчеты показывают, что в области близкой к стехиометрическому соотношению компонентов топлива ( $k_m=2,6$ ), все три программы дают достаточно близкие результаты, а при  $k_m=60$  наблюдаются большие различия.

Во-вторых существенное влияние на конечную температуру газа на выходе из ГГ, в области больших  $k_m$ , оказывает организация смесеобразования в нём. Так в ГГ двигателя РД-191 применены форкамерные форсунки, в которых температура факела, даже на режиме дросселирования двигателя достигает  $\geq 1500$  К. Ниже по потоку подмешивается кислород и температура газа снижается до 350 К [4].

Вторым важным фактором, влияющим на энергетическую увязку параметров ЖРД, является отличие реальных свойств газа, при его расширении в турбине, от свойств идеального газа [2]. Реальные газы, отличаются от идеальных тем, что их молекулы имеют вполне определенные размеры и между ними действуют силы межмолекулярного взаимодействия (силы притяжения и отталкивания), в зависимости от расстояния между молекулами. Наличие сил притяжения между молекулами, при относительно больших расстояниях между ними, приводит к

проявлению внутреннего давления, которое ведёт к дополнительному уменьшению объёма газа. Величина же самих молекул, занимающих вполне определённый объём, оказывает противоположное влияние на сжимаемость реального газа по сравнению с идеальным газом.

### Учет сжимаемости газов

Поведение реальных газов в окрестности критической точки существенно отличается от поведения идеальных газов, для которых в этой точке  $RT_{кр}/(p_{кр}V_{кр}) = 1$ , здесь  $R$  - газовая постоянная, а  $T_{кр}$ ,  $p_{кр}$  и  $V_{кр}$  – соответственно температура, давление и удельный объём газа в критической точке. Экспериментально полученные значения этого отношения для технически используемых газов лежат в диапазоне  $3,2 \div 5$ . Например, для кислорода этот коэффициент равен  $\sim 3,346$ , для водорода  $\sim 3,28$ , а для водяного пара  $\sim 4,5$ . При больших значениях удельного объёма сжимаемость реальных газов больше, а при малых - меньше, чем у идеального газа [6].

В современных двигателях давление в ГГ достигает  $\sim 50$  МПа и более, при температуре генераторного газа  $\sim 750 \div 1100$  К, что неизбежно может приводить к отличию сжимаемости реального газа от идеального. Это отличие, в зависимости от конкретных условий, может быть как в большую сторону по сжимаемости реального газа, так и в меньшую. Отличия свойств реального газа от идеального учитывается с помощью коэффициента сжимаемости  $Z$ , величина которого может быть как больше единицы, так и меньше, всё зависит от свойств газов и конкретно реализованных параметрах [3, 5, 6].

На рис.1 приведена зависимость коэффициента сжимаемости  $Z$  кислорода от температуры и давления. Из этого графика видно, что при давлениях  $\leq 1$  МПа и температурах  $\leq 1000$  °К, с достаточной для практики точностью можно использовать модель несжимаемого газа. Об этом же говорят и авторы работы [2], проведя анализ поведения коэффициента сжимаемости для метана, азота и водорода в зависимости от температуры и давления. При более высоких давлениях и температурах рабочего газа неучёт сжимаемости реальных газов приведёт к ошибкам при определении облика турбины разрабатываемого двигателя.

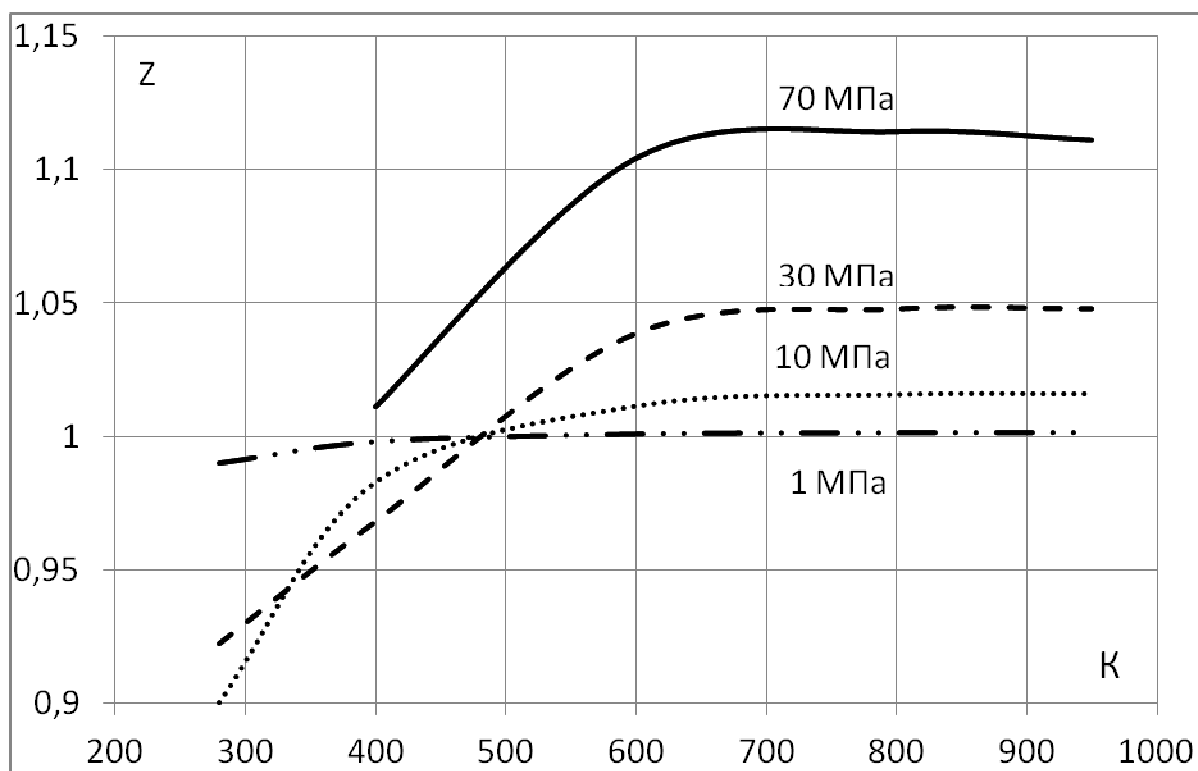


Рис.1. Зависимость коэффициента сжимаемости кислорода от температуры и давления [3].

На практике, при разработке ЖРД на топливной паре жидкий кислород – углеводородное горючее, чаще всего, отличие свойств реального газа от идеального проявляется в виде отличия реальной мощности турбины в большую сторону, по сравнению с её теоретическим значением [7], что связано с межмолекулярным взаимодействием.

### **Заключение**

При проведении энергетической увязки параметров ЖРД при расчете термодинамических параметров продуктов сгорания топливных пар необходимо учитывать неидеальность протекания химических реакций, при определении мощности турбин - отличие свойств реального газа от идеального.

### **Библиографический список**

1. Лебединский Е.Н., Мосолов С.В., Калмыков Г.П. и др. Компьютерные модели жидкостных ракетных двигателей. М.: Машиностроение. 2009. 375 с.
2. Валухов С.Г., Гуров В.И., Стернин Л.Е. и др. Учёт реальных свойств водородного газа при расчёте турбин. Журнал "Конверсия в машиностроении". 2004. №5. 11-13 с.
3. Шехтман А.М. Газодинамические функции реальных газов. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1988г. 175 с.
4. Аджян А.П.. Особенности разработки окислительного газогенератора многорежимного однокамерного двигателя. Труды НПО "Энергомаш". 2010, №27, 200 - 216 с.



5. Зубарев В.Н., Козлов А.Д., Кузнецов В.М. и др. Теплофизические свойства технически важных газов. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1989г. 232 с.
6. Техническая термодинамика. Под ред. д.т.н., проф. В.И. Крутова. М.: Высшая школа. 1971. 472 с.
7. Беляев Е.Н., Черваков В.В.. Математическое моделирование ЖРД. М.: МАИ. 2009. 278 с.