

01, март 2019

УДК 536.46

Предпроектная оценка модели течения рабочего тела в сопле жидкостного ракетного двигателя

Чвилёв Д.И., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ракетные двигатели»
tchwilyow@yandex.ru

Научный руководитель: Дорофеев А.А., к.т.н., д. пед. н., профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
a.a.dorofeev@bmstu.ru

Аннотация: Дан анализ химических реакций, протекающих в камере ЖРД, ЖРД МТ, ЖГГ, работающих на несимметричном диметилгидразине (НДМГ), разработана методика расчетного моделирования времени пребывания продуктов сгорания в ракетном двигателе и проведено моделирование химической неравновесности на основе предложенной Я.Б. Зельдовичем модели «закаливания» состава продуктов высокотемпературного сгорания. Методика реализована и апробирована с использованием программного комплекса «TERRA» в расчетах состава и свойств рабочего тела, вырабатываемого в камере систем, использующих НДМГ в качестве горючего.

Ключевые слова: ЖРД (LPRE), несимметричный диметилгидразин (*unsymmetrical dimethylhydrazine*), термодинамический расчет (*thermodynamic calculation*), химическая неравновесность (*chemical disequilibrium*), время пребывания (*stay time*), время релаксации (*relaxing time*).

Введение

Современное автоматизированное проектирование двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями (ЖРД), предусматривает использование получаемых термодинамическим расчетом характеристик продуктов сгорания и рабочих тел в предположении равновесного течения последних по проточной части сопла. Применение несимметричного диметилгидразина в качестве горючего создаёт возможность образования химически инертных веществ и, как следствие, химической

неравновесности. Не учитывая этот факт при проектировании ЖРД, величина действительного удельного пустотного импульса $I_{уд.п}$ будет меньше, полученного в результате термодинамического расчёта с допущением о равновесной модели течения.

Постановка задачи

Задача априорной термодинамической оценки пустотного удельного импульса $I_{уд.п}$, м/с на этапе, когда только определяется облик камеры ЖРД и профиль сопла еще не известен, включает в себя выбор модели течения по отношению к химическому равновесию [1]. Лента решения, представленная на рис. 1, ограничена мажорантой – расчетными данными, полученными в предположении химического равновесия, и минорантой – расчетными данными, полученными согласно модели с фиксированным химическим составом (так называемое «замороженное» течение).

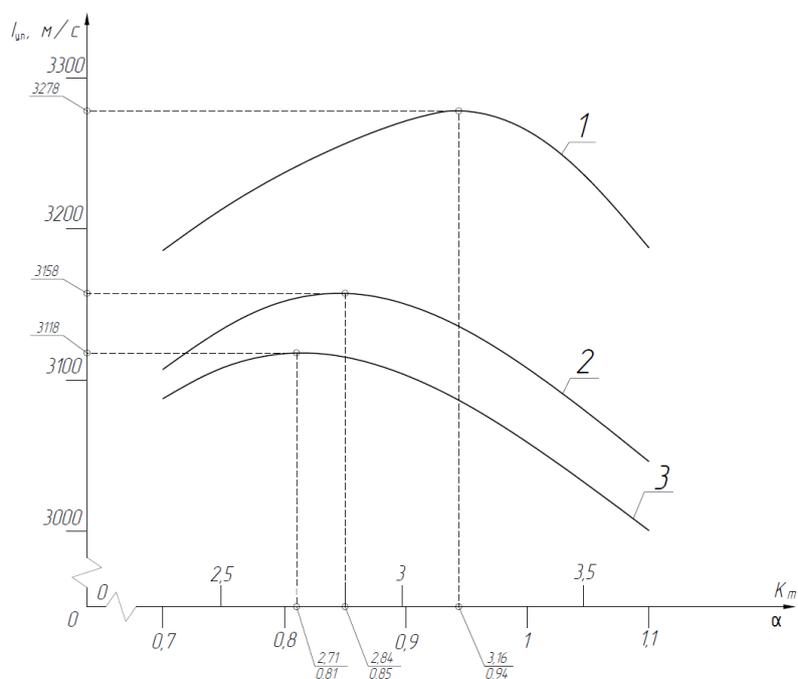


Рис. 1. Пустотный удельный импульс в зависимости от коэффициента избытка окислителя. Типичная конфигурация ленты решения задачи термодинамического расчета по условной оптимизации удельного импульса: 1 – мажоранта (расчет по равновесной модели); 2 – расчет по модели Брея; 3 – миноранта (расчет по модели «замороженного»

$$\text{течения}); \alpha_{opt3} < \alpha_{opt2} < \alpha_{opt1}$$

Согласно [1], некоторой промежуточной моделью является приближение Брея: равновесная модель на сужающемся участке сопла, и «замороженное» течение в расширяющейся части. Однако аргументированных количественных рекомендаций по применению той или иной модели в публикациях не приводится, исключая учебную

литературу, где равновесная модель рекомендуется для расчетов двигателей 1-х ступеней ракет-носителей (РН), а для ЖРД 3-х ступеней – приближение Брея, тогда как ЖРД 2-х ступеней в анализе не рассматриваются.

При этом влияние химической неравновесности сказывается и на значении основного априорного показателя эффективности ЖРД – расчетного значения пустотного удельного импульса $I_{уд.п.}$, и наиболее существенно – на экологические характеристики выхлопа ракетного двигателя в окружающую среду, в частности, на содержание оксидов азота N_xO_y [2].

Режим течения, и соответственно модель, определяется в основном соотношением между временем пребывания рабочего тела на конкретном участке $\tau_{пр}$ и временем, необходимым для установления химического равновесия по отношению к давлению и температуре в выходном сечении этого участка. Будем условно называть этот промежуток времени временем релаксации τ_p . Если рассчитывать τ_p по наиболее медленной реакции, то условием применимости модели равновесного течения (мажоранты) будет соотношение

$$\tau_p \leq \tau_{пр}, \quad (1)$$

обратное соотношение соответствует «замороженному» течению (миноранте)

$$\tau_{пр} \ll \tau_p, \quad (2)$$

что отвечает предельным допущениям для скоростей химических реакций $W_{хим} \approx \infty$ и $W_{хим} \approx 0$ соответственно.

Задачей настоящей статьи является разработка априорной (т.е. только по результатам базовых термодинамических расчетов в предположении химического равновесия при неизвестности профиля сопла) методики оценки режима течения рабочего тела в проточной части сопла и на этом основании подтверждение применимости моделей течения к конкретному типу камеры ЖРД: равновесной, «замороженной» или приближения Брея.

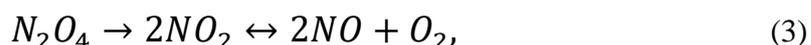
Методика решения задачи

Расчет времени релаксации характерных химических реакций. Данные по кинетическим характеристикам типичных химических реакций приводятся в работах [3 – 5] и представлены в таблице, которая косвенно подтверждает гипотезу Я.Б. Зельдовича и сотрудников [3], согласно которой реакции горения при умеренных давлениях порядка нескольких атмосфер идут почти равновесно при температуре, превышающей 1000...1500 К, а при меньшей температуре происходит фиксация состава

(«закаливание») продуктов прошедших реакций и продолжается обмен только тепловой энергией.

Эти данные [3–5] по результатам исходного термодинамического расчета, давления, температуры и радиуса сечения, для равновесной модели, например, с использованием программного комплекса Terra [6–7] и базы данных [8], позволяют оценить времена релаксации с точностью до порядка.

В реакции образования оксидов азота



первая стадия $N_2O_4 \rightarrow 2NO_2$ идет настолько быстро, время релаксации $\tau_p \approx 10^{-7} \dots 10^{-6}$ с [4], что можно считать отсутствующими молекулы азотного тетраксида (АТ) в любой точке проточной части ЖРД, включая ЖРД МТ. При этом можно считать, что с приближением к равновесию скорости прямой и обратной реакции сближаются с точностью примерно до порядка.

В качестве характерной относительно медленной реакции по данным работы [5] выберем термическое разложение аммиака



которое со значимыми для рабочих процессов в камере скоростями идет только при температурах $T \geq 1500$ К.

В данной работе расчёт времени релаксации τ_p ведётся по данным таблиц 1 и 2, значения которых экстраполируются до искомым. Причём влияние давления на реакцию разложения аммиака принимается пренебрежимо малым.

Таблица 1

Время химической релаксации (с) реакции (3) [4]

Т, К	Давление, МПа			
	0,1	1	2	5
700	$430 \cdot 10^{-3}$	$52,4 \cdot 10^{-3}$	$19,8 \cdot 10^{-3}$	$5,53 \cdot 10^{-3}$
800	$474 \cdot 10^{-3}$	$15,8 \cdot 10^{-3}$	$5,78 \cdot 10^{-3}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$
900	$211 \cdot 10^{-3}$	$6,77 \cdot 10^{-3}$	$2,42 \cdot 10^{-3}$	$0,629 \cdot 10^{-3}$
1000	$112 \cdot 10^{-3}$	$3,56 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$0,323 \cdot 10^{-3}$
1100	$67 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$0,51 \cdot 10^{-3}$	$0,173 \cdot 10^{-3}$
1200	$33 \cdot 10^{-3}$	$0,47 \cdot 10^{-3}$	$0,21 \cdot 10^{-3}$	$0,071 \cdot 10^{-3}$
1300	$16 \cdot 10^{-3}$	$0,19 \cdot 10^{-3}$	$0,08 \cdot 10^{-3}$	$0,029 \cdot 10^{-3}$
1400	$8 \cdot 10^{-3}$	$0,08 \cdot 10^{-3}$	$0,03 \cdot 10^{-3}$	$0,012 \cdot 10^{-3}$
1500	$4 \cdot 10^{-3}$	$0,03 \cdot 10^{-3}$	$0,01 \cdot 10^{-3}$	$0,005 \cdot 10^{-3}$

Расчетное время установления химического равновесия (с) при давлении 3,92 МПа (40 кгс/см²) как функция температуры [5]

Реакция	T=700 К	1000 К	1200 К	1500 К
$CH_4 \rightarrow C_{ТВ} + 2H_2$	$5,28 \cdot 10^{12}$	$3,55 \cdot 10^4$	17,74	$1,24 \cdot 10^{-2}$
$C_2H_6 \rightarrow 2C_{ТВ} + 3H_2$	$1,59 \cdot 10^7$	$0,99 \cdot 10^2$	$8,00 \cdot 10^{-2}$	$2,50 \cdot 10^{-4}$
$C_2H_4 \rightarrow 2C_{ТВ} + 2H_2$	$1,02 \cdot 10^2$	$2,16 \cdot 10^{-2}$	$9,24 \cdot 10^{-4}$	$2,50 \cdot 10^{-5}$
$2NH_3 \rightarrow N_2 + 3H_2$	$3,54 \cdot 10^{12}$	$1,11 \cdot 10^4$	6,31	$5,02 \cdot 10^{-3}$
$CO_2 + C_{ТВ} \rightarrow 2CO$	$1,59 \cdot 10^8$	$7,20 \cdot 10^2$	$3,00 \cdot 10^{-1}$	$1,00 \cdot 10^{-3}$

Расчет времени пребывания рабочего тела. Если для характерных реакций времена релаксации τ_p могут быть определены по данным таблиц 1 и 2 и при этом не требуются характеристики профиля сопла, и в частности, его линейные размеры, то расчет времени пребывания $\tau_{пр}$, необходимого для определения режима химической неравновесности по соотношениям (1) и (2), рассчитывается интегрированием выражения (5)

$$d\tau = dx/W(x), \quad (5)$$

где $W(x)$ – распределение скорости по длине проточной части сопла.

Обработка данных, приведенных в работах [9–11], показала, что с учетом приближенного аффинного подобия образующих сопел, описанных ЖРД, представляется возможным найти обобщенную аппроксимацию распределения скорости по длине проточной части сопла. Предлагается зависимость

$$\lambda(\bar{D}) = \frac{1}{C^p} [-(\arctg[-(\bar{D} - 1) \operatorname{tg}(C)])^p + C^p] \quad \text{при } \bar{D} < 1 \quad (6)$$

$$\lambda(\bar{D}) = \frac{1}{C^p} [(\arctg[(\bar{D} - 1) \operatorname{tg}(C)])^p + C^p] \quad \text{при } \bar{D} \geq 1 \quad (7)$$

где $\lambda = \frac{W}{a_{кр}}$ – приведенная скорость; \bar{D} – безразмерный диаметр, равный отношению текущего диаметра к критическому $\frac{D_i}{D_{кр}}$ при $D_i \geq D_{кр}$ и отношению критического диаметра к текущему $\frac{D_{кр}}{D_i}$ при $D_i < D_{кр}$; C – константа, определяющаяся по формуле: λ

$$C = \frac{\frac{\pi}{2}}{\left(\sqrt{\frac{n+1}{n-1}} - 1\right)^{\frac{1}{p}}};$$

p – коэффициент, компенсирующий неопределенность полной геометрии сопла (осевые размеры) на данном этапе проектирования; n – осреднённый по соплу показатель изоэнтропы.

На основе анализа, проведённого в данной статье, рекомендуются следующие значения коэффициента p :

- для двигателей III ст. $p = 0,40$;
- для двигателей II ст. $p = 0,31$;
- для двигателей I ст. $p = 0,27$;

Именно эти коэффициенты обеспечивают наименьшую погрешность, рассматриваемой функции с результатами термодинамических расчетов.

Помимо геометрии сопла, характеризующейся безразмерным диаметром \bar{D} и коэффициента p , функция $\lambda = f(\bar{x})$ зависит также от рода продуктов сгорания, характеризующихся показателем изоэнтропы n .

При этом соотношения (6) и (7) удовлетворяет значениям в характерных точках: λ_{\min} соответствует изобарной или скоростной камере, $\lambda(\bar{D}_{\text{кр}}) = 1$ и $\lim_{\bar{x} \rightarrow \infty} \lambda(\bar{x}) = \lambda_{\max}$, а при известном значении λ_i координата соответствующего сечения D_i определяется численным решением уравнения $\lambda(\bar{D}_i) = \lambda_i$.

Для выбранной системы безразмерных координат время пребывания рабочего тела в проточной части сопла $\tau_{\text{пр}, D_{\text{вх}}-D_i} = \tau(\bar{D})$ – на участке от сечения с координатой $\bar{D}_{\text{вх}}$ до произвольного выходного сечения сопла с координатой \bar{D}_i – рассчитывается по формуле

$$\tau_{\text{пр}, D_{\text{вх}}-D_i} = \tau(\bar{D}) = \frac{L_{\text{суж}}}{a_{\text{кр}}} \int_{\bar{D}_{\text{вх}}}^{\bar{D}_i} \frac{1}{\lambda(\bar{D})} d\bar{D}, \quad (8)$$

где значение длины сужающейся части $L_{\text{суж}}$ сопла берется в метрах, а скорость в критическом сечении $a_{\text{кр}}$ в м/с.

Апробацию аппроксимации (6) и (7) проведем сравнением распределений безразмерной скорости $\lambda(\bar{D})$ по длине сопла, и полученное термодинамическим расчетом для ЖРД 1-ой ступени РД-214 [11], РД-224 [11], 2-ой ступени РД-108 [10], РД-119 [10] и 3-ей ступени РД-0213 [9] ракет-носителей. На рис. 2 графически представлены РД-119 [10], РД-224 [11] и РД-0213 [9]. Здесь представлены расчетные данные по аппроксимирующим выражениям (6) и (7) и кривые, построенные по результатам термодинамического расчета для реальных профилей сопел соответствующих ЖРД.

Значения полных времён пребывания продуктов сгорания в сопле ракетного двигателя сведены в табл. 3.

Времена пребывания рабочего тела в проточной части сопла различных двигателей

ЖРД	Ст.	Время пребывания, мс		Погрешность Δ , %
		Из уравнения (8)	По результатам термодинамического расчета	
РД-214 [11]	I	0,909	0,911	0,22
РД-224 [11]	I	1,010	0,974	3,56
РД-108 [10]	II	0,931	0,973	4,32
РД-119 [10]	II	0,608	0,602	0,99
РД-0213 [9]	III	0,469	0,474	1,05

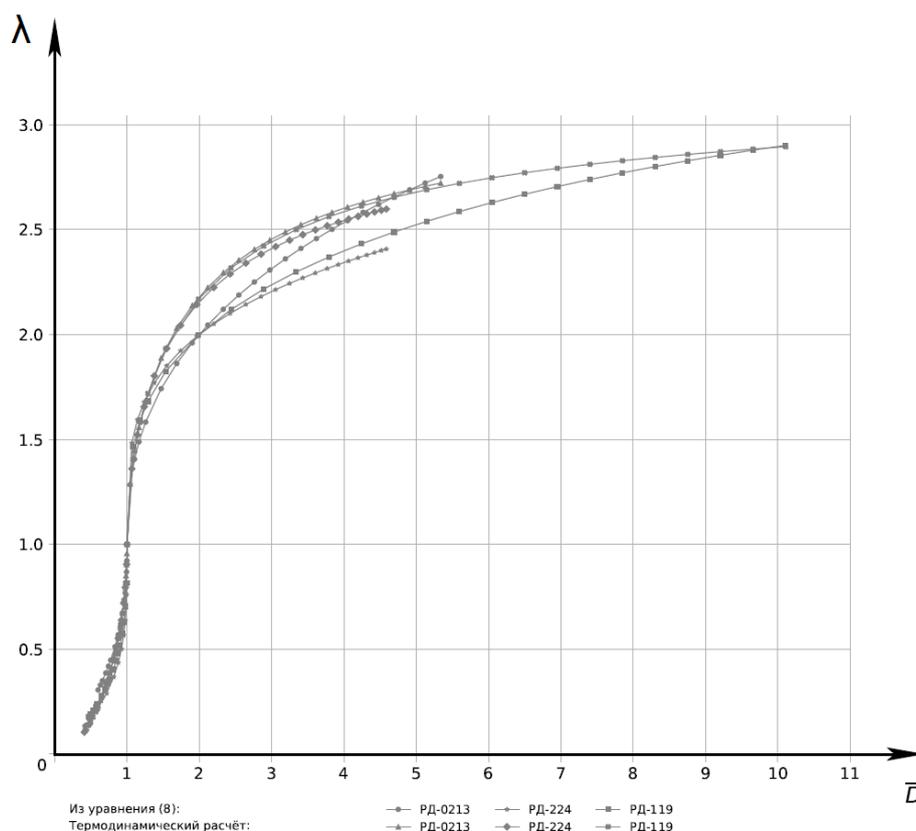


Рис. 2. К сравнению безразмерной скорости

Из графиков на рис. 2 видно, что разница у двух функций не столь значительна и наблюдается схожий тип зависимостей, а разница в общем времени пребывания в камере ракетного двигателя, как показано выше, составляет менее 5%. Погрешность можно объяснить тем, что предложенная зависимость использует осреднённое значение показателя изоэнтропы n , тогда как программа Terra [6] позволяет вычислять показатель изоэнтропы n в каждом сечении.

Таким образом, можем сделать вывод, что время пребывания продуктов сгорания с НДМГ в роли горючего в ЖРД больших тяг составляет порядка 10^{-3} с. А для ЖРД МТ и

ЖГГ ещё меньше в виду меньшей длины сопла. Итого, согласно нашим оценкам, время прохождения сопла рабочим телом, как правило, не превышает $10^{-5} \dots 10^{-4}$ с.

Приемлемое расхождение между зависимостями, с учетом того, что время релаксации вычисляется с точность до порядка, позволяет рассчитывать время пребывания $\tau_{пр}$, например, численно интегрируя соотношение (8), в котором распределение $\lambda(\bar{D})$ принимается по аппроксимирующим выражениям (6) и (7). Для конкретных камер на основе расчета времени релаксации $\tau_{пр}$ по данным таблиц 1 и 2 и выполнимости условий (1) или (2), можно будет судить о приемлемости той или иной модели течения химически активного рабочего тела.

Применение методики и обсуждение результатов. Применим изложенную методику априорной оценки режима течения рабочего тела в сопле к ЖРД, представленным в работах [9 – 11], работающих на топливах с несимметричным диметилгидразином (НДМГ) $(\text{CH}_3)_2\text{NNH}_2$ в качестве горючего (для двигателя РД-108 [10] керосин был условно заменен НДМГ при использовании программного комплекса Terra [6–7]). Рассчитанные данные сведем в таблицы 4 и 5 в виде, удобном для обоснования модели течения: равновесной, «замороженной» или Брея.

В табл. 4 и 5 используются следующие обозначения: T_k – температура в камере сгорания двигателя; $\tau_{пр}$ – время пребывания указанного вещества в камере двигателя, начиная с сечения с температурой T_{frex} ; τ_p – время установления химического равновесия в камере двигателя при температуре T_{frex} ; T_{frex} – температура, начиная с которой времена релаксации превышают времена пребывания веществ; T_a – температура в выходном сечении двигателя; $I_{уд,п}$ – пустотный удельный импульс двигателя при «замораживании» данного вещества; $\overline{I_{уд,п}}$ – средний арифметический пустотный удельный импульс двигателя полученный от «замораживания» рассмотренных реакций.

Необходимо отметить, что для метана характерны те же температуры фиксации T_{frex} , что и для аммиака согласно таблице 2 и данным работы [5].

Таблица 4

К оценке режима течения рабочего тела в соплах ЖРД для реакции (3)

ЖРД	$\frac{D_a}{D_{кр}}$	Ст.	T_k , К	NO_2				T_a , К	$\overline{I_{уд,п}}$, м/с	Назначение
				$\tau_{пр}$, мс	τ_p , мс	T_{frex} , К	$I_{уд,п}$, м/с			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
РД-214 [11]	3,068	I	3380	—	—	—	3028	1936	3028	I ступень РН Р-12
РД-224 [11]	4,574	I	3142	0,861	1,075	1690	2831	1282	2876	Нач. стадия разраб. для II ст. РН Н1

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
РД-108 [10]	4,337	II	3625	—	—	—	3340	1956	3340	Сер. для РН «Союз-ФГ» и «Союз-2»
РД-119 [10]	10,118	II	3545	0,331	0,332	1858	3335	1094	3408	Сер. для 2 ст. РН «Космос»
РД-0213 [9]	5,337	III	3509	0,361	0,375	1841	3128	1524	3194	III ст. РН "Протон-К"

Таблица 5

К оценке режима течения рабочего тела в соплах ЖРД для реакции (4)

ЖРД	$\frac{D_a}{D_{кр}}$	Ст.	T_k, K	NH_3				T_a, K	$\bar{I}_{уд.п}, м/с$	Назначение
				$\tau_{пр}, мс$	$\tau_p, мс$	T_{frex}, K	$I_{уд.п}, м/с$			
РД-214 [11]	3,068	I	3380	—	—	—	3028	1936	3028	I ступень РН Р-12
РД-224 [11]	4,574	I	3142	0,929	1,279	1524	2920	1282	2876	Нач. стадия разраб. для II ст. РН Н1
РД-108 [10]	4,337	II	3625	—	—	—	3340	1956	3340	Сер. для РН «Союз-ФГ» и «Союз-2»
РД-119 [10]	10,11 8	II	3545	0,396	0,437	1561	3481	1094	3408	Сер. для 2 ст. РН «Космос»
РД- 0213 [9]	5,337	III	3509	0,455	0,521	1555	3259	1524	3194	III ст. РН "Протон-К"

Выводы

На основе предложенной аппроксимации распределения относительной скорости разработана методика обоснования модели течения рабочего тела в сопле ЖРД для предпроектных расчетов, когда осевые размеры камеры еще неизвестны, и получено качественное, с точностью до порядка, подтверждение, представленное в табл. 6, применимости для двигателей, использующих в качестве горючего НДМГ:

- модели равновесного течения для расчета удельного импульса ЖРД первых ступеней ракет-носителей и ЖРД второй ступени, начинающих работу с момента старта;
- для ЖРД вторых ступеней, начинающих работу после отделения первой ступени, рекомендуется модель равновесного течения до сечения с температурой 1500...2000 К;
- приближения Брея для двигателей третьих ступеней ракет-носителей;

– модель химически инертного течения на всем протяжении проточной части для ЖРД малых тяг.

Наиболее точные результаты могут быть получены при расчете течения по участкам проточной части с локальной оценкой времени пребывания и времени релаксации, и соответствующим выбором модели течения – равновесной, замороженной или условно неравновесной с фиксацией концентраций наиболее медленно реагирующих компонентов, например, таких как метан CH_4 или аммиак NH_3 .

Таблица 6

К обоснованию вывода модели режима течения рабочего тела в проточной части сопла

ЖРД	Ст.	Модель – равновесная		Модель – по Брюе		Вывод
		$I_{уд.п.}$, м/с	Погрешность Δ , %	$I_{уд.п.}$, м/с	Погрешность Δ , %	
РД-214 [11]	I	3028	0	2933	3,14	Равн.
РД-224 [11]	I	3044	5,52	3001	4,17	Равн.
РД-108 [10]	II	3340	0	3199	4,22	Равн.
РД-119 [10]	II	3698	7,84	3551	4,03	Равн.
РД-0213 [9]	III	3272	2,38	3155	1,22	Брей

Список литературы

- [1]. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. В 10 (12) т. Т. 1. Под ред. академика В.П. Глушко (ответственный редактор), В.Е. Алемасова (зам. ответственного редактора), А.П. Ваничева, С.Д. Гришина, В.А. Ильинского, А.Ф. Дрегаллина, А.П. Тишина, Н.В. Илларионова. – АН СССР, 1971. 267 с.
- [2]. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. – М.: Наука, 1980. 479 с.
- [3]. Агеенко Ю. И. Исследование параметров смесеобразования в жидкостных ракетных двигателях малой тяги со струйно-центробежной системой смешения компонентов топлива на стенке камеры сгорания // Космонавтика и ракетостроение, 2009, № 4 (57), С. 170-176.
- [4]. Негорючие теплоносители и гидравлические жидкости. Справочное руководство / Под ред. А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1979. – 360 с.
- [5]. Беляев Н.М. Системы наддува топливных баков ракет. Под ред. д.т.н., проф., член-корр. АН УССР В.М. Ковтиненко. – М.: Машиностроение, 1976. – 336 с.
- [6]. Trusov B.G. Program system TERRA for simulation phase and chemical equilibrium // Proc. Of the XIV intern. symp. On Chemical Thermodynamics, St-Petersburg, Russia, 2002. P. 483-484.

- [7]. Трусов Б.Г. Программная система моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // Инженерный журнал: наука и инновации.– 2012. №1. С. 21.
- [8]. База данных «Термические Константы Веществ» (рабочая версия – 2). Рук. работы Иориш В.С. и Юнгман В.С.: URL: <http://www.chem.msu.ru> – (обращение 18.11.2018)
- [9]. Атлас конструкций ЖРД. Часть 1. Авт. коллектив: Гахун Г.Г., Алексеев И.Г., Березанская Е.Л., Гутковский Э.Л., Хованский О.М. Под общей редакцией проф. Гахуна Г.Г. — М.: МАИ, 1969. — 142 с
- [10]. Альбом конструкций ЖРД. Часть III. Составители: С.П. Агафонов, А.Д. Вебер, Г.А. Вельт и др. Под руководством академика В.П. Глушко. – М.: Военное изд-во Министерства обороны СССР, 1969 – 204 с.
- [11]. Альбом конструкций ЖРД. Часть IV. Составители: С.П. Агафонов, А.Д. Вебер, Г.А. Вельт и др. Под руководством академика В.П. Глушко. – М.: Военное изд-во Министерства обороны СССР, 1972 – 212 с.