

Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала: http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/



УДК 621.45.015.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ТЯГИ И УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА КАМЕРЫ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ СРЕДСТВАМИ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ANSYS

¹Савиных А.А., Марк М.А., Погорелов М.А., Юрьев В.А.

ФГБОУ ВО "БАЛТИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "ВОЕНМЕХ" ИМ. Д.Ф. УСТИНОВА", Санкт-Петербург, Россия (190005, город Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1), e-mail: ¹alex.savinyh02@mail.ru

Статья посвящается исследованию результирующих параметров течения камеры ракетного двигателя. Цель работы – выполнение комплекса работ по расчету и моделированию камеры ракетного двигателя. В процессе работы проводилось моделирование камеры ракетного двигателя, расчет течения продуктов сгорания с помощью программного пакета Ansys, сопоставление полученных результатов с параметрами аналитического расчета согласно проектирочным пособиям. В результате проделанной работы произведен расчет течения продуктов сгорания в камере ракетного двигателя, а также произведено аналитическое сравнение параметров расчета Ansys и аналитического расчета.

Ключевые слова: Камера ракетного двигателя, течение продуктов сгорания, тяга, удельный импульс, Ansys, температура, давление, массовый расход, азотный тетраоксид, несимметричный демитилгидразин, Workbench, Fluent.

DETERMINING THE VALUE OF THRUST AND SPECIFIC IMPULSE OF A ROCKET ENGINE CHAMBER USING THE ANSYS SOFTWARE PACKAGE

¹ Savinykh A.A., Mark M.A., Pogorelov M.A., Yuryev V.A.

"BALTIC STATE TECHNICAL UNIVERSITY "VOENMEH" D.F. USTINOVA", St. Petersburg, Russia (190005, Saint-Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya str., 1), e-mail: 1alex.savinyh02@mail.ru

The article is devoted to the study of the resulting parameters of the rocket engine chamber flow. The purpose of the work is to perform a set of works on the calculation and modeling of the rocket engine chamber. In the process of work, the rocket engine chamber was modeled, the combustion products flow was calculated using the Ansys software package, and the obtained results were compared with the parameters of the analytical calculation according to design manuals. As a result of the work done, the combustion products flow in the rocket engine chamber was calculated, and an analytical comparison of the Ansys calculation parameters and the analytical calculation calculation was made.

Keywords: Rocket engine chamber, combustion flow, thrust, specific impulse, Ansys, temperature, pressure, mass flow, nitrogen tetroxide, unsymmetrical dimethylhydrazine, Workbench, Fluent.

Определение исходных параметров расчета

Исходными данными для проектирования являются следующие параметры:

- топливо АТ+НДМГ (азотный тетраоксид + несимметричный диметилгидразин) с характеристиками согласно работе [3];
- тяга в пустоте 140 кH;
- давление на срезе сопла 0,007 МПа.

Таким образом, сведем все известные параметр в Таблицу 1.

Таблица 1 - Исходные параметры проектирования	
Тяга в пустоте, кН	140
Давление на срезе сопла, МПа	0,007
Плотность АТ, кг/м ³	1441
Плотность НДМГ, кг/м ³	787

Дальнейший расчет проведен согласно методическим пособиям [4, 5] и программе Тегтогаз. Результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 1.

Таблица 2 - Результирующие параметры проектирования

Давление в камере сгорания (КС), МПа	8
Рабочее соотношение компонентов	2,078
Массовый расход в КС, кг/с	43
Температура в КС, К	3270
Газовая постоянная продуктов сгорания (ПС), Дж/(кг×К)	382
Показатель процесса	1,182
Удельный импульс КС, м/с	3188

: 1:Alfa:	.67850:	.67850:	.67850:	.67850:	.67850:	.67850:
: 2:K1 :	2.07756:	2.07756:	2.07756:	2.07756:	2.07756:	2.07756:
: 3:Pps :	7.00000:	3.97558:	.00700:	8.00000:	4.53742:	.00700:
: 4:Tps : 1	3267.16545:	3027.12404:	897.36191:	3275.89274:	3032.0805	4: 869.83883:
: 5:Ips :	91.10866:	-587.32947:	-4948.36990:	91.05287:	-589.87992:	-4993.48009:
: 6:Sps :	11.52128:	11.52125:	11.52127:	11.47021:	11.47024:	11.47021:
: 7:Mu :	21.74163:	21.89837:	22.13321:	21.75835:	21.91026:	22.13322:
: 8:Cp.r:	3.22911:	2.98910:	1.64418:	3.37566:	2.91415:	1.63378:
: 9:Cp.g:	3.22911:	2.98910:	1.92034:	3.37566:	2.91415:	1.92341:
:10:Cp.f:	2.08328:	2.06381:	1.64418:	2.08399:	2.06424:	1.63378:
:11:????:	382.41887:	379.68172:	375.65311:	382.12500:	379.47557	: 375.65290:
:12:n :	1.18324:	1.18666:	1.29613:	1.18218:	1.18943:	1.29858:
:13:z :	.00000:	.00000:	.00000:	.00000: .		.00000:
:14:a : 1	210.04877:	1164.56544:	661.00085:	1210.97099:	1166.75779	e: 651.39934:
:15:Nu :	.00010:	.00009:	.00004:	.00010:	.00009:	.00004:
:16:Al.g:	.34075:	.32002:	.10599:	.34137:	.32037:	.10273:
:17:Al.r:	.52817:	.46350:	.12379:	.55295:	.45227:	.12095:
:18:Pr :	.59619:	.59861:	.57766:	.59655:	.59887:	.57687:
:19:k.z :	.00000:	1.17313:	1.23404:	.00000:	1.17461:	1.23571:
:20:M :	.00000:	1.00021:	4.80278:	.00000:	1.00017:	4.89531:
:21:Is :	.00000:	1164.81494:	3174.64090:	.00000:	1166.95452:	3188.80043:
:22:Ip :	.00000:	2151.53275:	3280.82513:	.00000:	2152.94023:	3291.27078:
:23:Beta:	.00000:	1737.36383:	.00000:	.00000:	1738.40927:	.00000:
:24:F.ud:	.00000:	2.48195:	151.69176:	.00000:	2.17301:	146.38621:
:25:F.* :	.00000:	1.00000:	61.11801:	.00000:	1.00000:	67.36559:

Рисунок 1 – Параметры продуктов сгорания в программе Termoras

Расчет газодинамического профиля камеры ракетного двигателя (КРД) производится согласно пособию [7] и имеет следующий вид (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Газодинамический профиль КРД

Эти параметры КРД являются исходными для моделирования процессов в программном пакете Ansys.

Моделирование расчетной области и расчет течения в программе Ansys

Для начала построим модель камеры и расчетной области в 2D, используя программу Компас, согласно исходным данным. Расчет будет выполняться посредством осесимметричного 2D тела, а не воспроизведением полноразмерной 3D модели, так как это экономит вычислительные затраты. Полученный результат представлен на рисунках 3-4. Файл сохраняем в формате x.t.



Рисунок 3 – Модель расчетной области в Компас



Рисунок 4 – Эскиз газодинамического профиля КРД

Затем переходим в программу Ansys, где итоговое окно Workbench выглядит следующим образом (рисунок 5). Расчет проведен согласно методическим пособиям [1, 2, 6, 8].

Tyaga_2D - Workbench									-	a ×
File View Tools Units Extensio	ons Jo	bs Help								
0 8 8 8 0										
allowing lines (contract)										
C M M Project										
Dimport Reconnect Refres	sh Project	🕖 Update Proj	ect ### ACT Start Page							
Toolbox 🔹 🔍 🗙	Project	Schematic			* # X	Propert	es of Project Schematic			* 7 X
El Analusis Sustans						-				
Coupled Field Date							-		D	
Coupled Field Translert		▼ A	- B - C - D			1	Property		VBUE	
Eleanualua Buckling		1 Test Council	1 M March 1 B Barris 1 M Danie			2	Notes	2		
(iii) Flectric		2 2				3	Notes			
Di Explicit Dynamics		2 Geomet	y v a z w setup v a z w setup v a z w setup v a z v kesuts v a			4	 Solution Process 		la su	
Eluid Flow - Blow Melding (Polyt)		Geomet	y 3 Mesh 3 Solution Results			5	Update Option	Run in Foreground		2
Fluid Flow-Extrusion(Polyflow)			Mesh Fluent							
Fluid Flow (CFX)										
Fluid Flow (Fluent)										
Fluid Flow (Polyflow)										
Harmonic Acoustics										
Harmonic Response										
Hydrodynamic Diffraction										
Hydrodynamic Response										
1C Engine (Fluent)										
Magnetostatic										
Modal										
Modal Acoustics										
Random Vibration										
Response Spectrum										
Rigid Dynamics										
SPEOS										
Static Acoustics										
C Static Structural										
1 Steady-State Thermal										
1 Thermal-Electric										
Topology Optimization										
Transient Structural										
C. Transient Thermal										
Turbomachinery Fluid Flow										
E Component Systems										
ACP (Post)										
ACP (Pre)										
Autodyn	Messag				* # X					
BladeGen		A	8	c	D					
CFX CFX		Tune		Association	Date/Dire					
S Engineering Data		1.4745	TEX	ANDCARD	Date/Time					
EnSight (Forte)	2	Informational	Appreciator Ford Proceeding of the Approximation of		23.12.2024 13:07:30					
External Data	-									
bternal Model										
Figers										
Enda										
Ganmator										
GDANTA MI										
visititititi v										
View All / Customize										
Past							IT tob Manifes	The DBC Connection	Burnan	Hide 1 Meessage
(ALLAS)		1.1					And AND HORSON	and una cumectionsho	mrivgress 💭	mue i messages

Рисунок 5 – Рабочее окно Workbench (итоговый)

В программном пакете Ansys нам необходимо:

- 1. задать геометрию;
- 2. построить сетку;
- 3. провести расчет течения;
- 4. сравнить полученные результаты с аналитическими.

Открываем модуль Geometry с помощью DesignModeler и выполняем следующий порядок операций:

- 1. импортировать построенную геометрию;
- 2. переопределить толщину пластины до 0 м с помощью функции Thin;

3. определить с помощью функции Named Selection входную границу (inlet), выходную (outlet), стенку (wall) и ось вращения (axis);

4. задать дополнительные построения в Sketching и разделить поверхность на подповерхности с помощью Face split для дальнейшего формирования сетки с областями разноразмерных ячеек;

5. переопределить расчетную область с твердого тела (solid) на жидкое (fluid).

Результаты операций представлены на Рисунках 6-9.



Рисунок 6 – Модель расчетной области в Geometry



Рисунок 7 – Дерево модели в Geometry



Рисунок 8 – Расчетная область после дополнительных построений



Рисунок 9 – Увеличенный вид стенки (wall) расчетной области

Завершив операции в модуле Geometry, переходим в окне Workbench в сеточный построитель Mesh. Здесь нам необходимо:

1. через операцию Face Sizing выставить элементарный размер ячеек для трех полученных с помощью дополнительных построений в модуле Geometry областей;

2. задать сгущение сетки в зоне пограничного слоя КС операцией Inflation;

3. проверить Named Selection на соответствие заданным ранее входной границы (inlet), выходной (outlet), оси (axis) и стенки (wall).

Результаты перечисленных выше операций представлены на рисунках 10-18.



Рисунок 10 – Рабочее окно Mesh

Outline	- ₽ □ ×	0, 0, 👰 📽 😵 😘 🗘 * 🔆 0, 0, 0, 0, 0, steet 🔧 Moder 📰 🗄 🕲 🕲 🕲 🕲 🖏 🛠 🤫 🛅 Cipboard* (Empty) 😥 Extends 🙎 Salect Byr - 🖷 Convert* 🖕
Name Project P	of jean-Carlos ♥ • et al. 100 et al. 10	In the state of th
		z
Details of "Face Sizi	ng" - Sizing 🔷 🔻 🖡 🗖 🗙	
B Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	•
Geometry	1 Face	X - X
Definition		
Suppressed	No	0.00 500.00 1000.00 (see a)
Type	Element Size	
Element Size	50, mm	22.00 75.00
Advanced		Rindea tradica
Defeature Size	0,5 mm	and the second se
Behavior	Soft	Selection information
Growth Rate	Default (1,2)	Coordinate System: Global Coordinate System * 😼 Show Individual and Summary * 🖌
Capture Curvature	No	No Selection
Capture Proximity	No	

Рисунок 11 – Настройка первой области в Face Sizing



Рисунок 12 – Настройка второй области в Face Sizing



Рисунок 13 – Настройка третьей области в Face Sizing



Рисунок 14 – Задание сгущения возле стенки (wall) через Inflation



Рисунок 15 – Проверка правильности задания Inlet



Рисунок 16 – Проверка правильности задания Axis



Рисунок 17 – Проверка правильности задания Outlet



Рисунок 18 – Проверка правильности задания Wall

В результате запуска сеточного построителя программа выдала следующий результат – рисунки 19-21.



Рисунок 19 – Сетка расчетной области



Рисунок 20 – Увеличенный вид сетки в зоне КС



Рисунок 21 – Результат сгущения сетки возле стенки КС

После завершения построения сетки переносим результаты и переходим в модуль Fluent. В модуле Fluent выполняем следующие шаги:

- 1. выставляем осесимметричное тело (axisymmetric);
- 2. включаем модель Energy и модель турбулентности SST k-omega;
- 3. задаем параметры газа, на основе ПС (рисунок 1);
- 4. в Cell Zone Conditions выставляем параметр окружающего давления 0 Па, так как двигатель второй ступени (значение давления на срезе сопла согласно исходным данным 0,007 МПа);

- 5. в Boundary Conditions выставляем параметры Pressure-Inlet и Pressure-Outlet;
- 6. задаем методику расчета;
- 7. проводим инициализацию;
- 8. запускаем решатель с определенным количеством итераций.

Перечисленные шаги представлены на рисунках 22-32. Исходные данные для газа и для граничных условий принимались из результирующих параметров программы Termoras для ПС (Рисунок 1) и расчета согласно пособию (Таблица 2).

Task Page	<
Models	?
Models	
Multiphase - Off Energy - On Viscous - SST k-omega Radiation - Off Heat Exchanger - Off Species - Off Discrete Phase - Off Solidification & Melting - Off Acoustics - Off Structure - Off Potential/Li-ion Battery - Off	
Edit	

Рисунок 22 – Настройки расчетной модели

Name	Materia	а Туре		Order Materi	als by
air	fluid	uid 🔹		Name	
hemical Formula	Fluent	Fluid Materials	O Chemical Formula		
	air		•		
	Mixture	9		Fluent	atabase
	none		-	GRANTA ME	S Database
				User-Define	ed Database
Properties					
	Density (kg/m3)	ideal-gas		*	Edit
Cn (Specifi	c Heat) (i/ko-k)	constant		•	Edit
-+ (-+	o	3000			
Thermal Cond	uctivity (w/m-k)	constant		-	Edit
		0.3			
Vis	cosity (kg/m-s)	constant	*	Edit	
		7e-05			
Molecular W	eight (kg/kmol)	constant		*	Edit
		22.13			

Рисунок 23 – Задание параметров газа на основе ПС

Pressure	Gravity
Operating Pressure (pas	cal) Gravity
0	· ·
Reference Pressure L	ocation
X (m) 0	•
Y (m) 0	-
Z (m) 0	-



Fluid								×
Zone Name								
fluid.1								
Material Name air		▼ Edit.						
Frame Motion	Laminar Z	one 🗌 Sourc	e Terms					
Mesh Motion		Fixed	Values					
Porous Zone								
Reference Frame	Mesh Motion	Porous Zone	3D Fan Zone	Embedded LES	Reaction	Source Terms	Fixed Values	Multiphase
			Apply	Close Help				

Рисунок 25 – Применение заданного материала для расчетной области

inlat	3						
iniet							
Momentum	Thermal	Radiation	Species	DPM	Multiphase	Potential	UDS
	Referen	ice Frame	bsolute				-
	Gauge Tota	l Pressure (pascal) 80	00000			•
Supersoni	c/Initial Gauge	e Pressure (j	pascal) 0				•
Directi	on Specificatio	on Method	lormal to E	loundary			-
Prever	nt Reverse Flo	w					
Т	urbulence						
	Specification	n Method In	tensity and	Length S	cale		-
							-
	Turbulent	Intensity (%	6) 5				
	Turbulent Turbulent Len	t Intensity (% gth Scale (n	6) 5 n) 0.02				-

Рисунок 26 – Задание входных условий (давления)

ne Name							
let							
Momentum	Thermal	Radiation	Species	DPM	Multiphase	Potential	UDS
		reduction	opecies	Ditt	Thataphabe		000
otal Tempe	erature (k)	3270					
	Рисунок	а 27 – Задал	ние вході	озе Не	р вий (темп	ературы)	
Pressure	Рисунок e Outlet	а 27 — Задал	ние вході	ных усло	р вий (темп	ературы)	×
Pressure Zone Name	Рисунок e Outlet	27 — Зада	ние вході	ных усло	ф вий (темп	ературы)	×
Pressure Zone Name outlet	Рисунок e Outlet	27 — Зада	ние вході	ных усло	вий (темп	ературы)	×
Pressure Zone Name outlet Momentum	Рисунок e Outlet thermal	А 27 — Задал Radiation	ирру Сі ние вході	озе Не	Ір вий (темп Multiphase	ературы) Рotential	UDS
Pressure Zone Name outlet Momentum	Рисунок e Outlet Thermal Backflow F	27 — Задал Radiation Reference Fran	ррју Сі ние вході Species me Absolute	озе Не ных усло	Ір вий (темп Multiphase	ературы) Potential	UDS T
Pressure Zone Name outlet Momentum	Рисунок e Outlet Thermal Backflow F	27 — Задал Radiation Reference Fran Gauge Press	ррју Сі ние входи Species me Absolute sure (pascal)	озе Не ных усло DPM e 7000	Iр вий (темп Multiphase	ературы) Potential	UDS
Pressure Zone Name outlet Momentum	Рисунок e Outlet Thermal Backflow F Pressure	а 27 — Задал Radiation Reference Fran Gauge Press Profile Multip	ырру С ние входи Species me Absolute sure (pascal) plier 1	озе Не ных усло орм е 7000	Ір вий (темп Мultiphase	ературы) Potential	
Pressure Zone Name outlet Momentum Backflow D	Рисунок e Outlet Thermal Backflow F Pressure Direction Spec	а 27 — Задал Radiation Reference Fran Gauge Press Profile Multip cification Meth	ррју Сі ние входи Species me Absolute sure (pascal) plier 1 hod Normal	оse Не ных усло DPM e 7000 to Boundary	Iр вий (темп Multiphase	ературы) Potential	
Pressure Zone Name Outlet Momentum Backflow D Ba	Рисунок e Outlet Thermal Backflow F Pressure Direction Spee	а 27 — Задал Radiation Reference Fran Gauge Press Profile Multip cification Meth-	ррју Сі ние входи Species me Absolute sure (pascal) plier 1 hod Normal tion Total Pr	оse Не ных усло DPM e 7000 to Boundary ressure	Iр вий (темп Multiphase	ературы) Potential	
Pressure Zone Name outlet Momentum Backflow D Ba Preven	Рисунок e Outlet Thermal Backflow F Pressure Direction Spec ckflow Press	Radiation Reference Fran Gauge Press Profile Multip cification Meth- ture Specificat	ррју Сі ние входи Species me Absolute sure (pascal) plier 1 hod Normal tion Total Pr	оse Не ных усло DPM e 7000 to Boundary ressure	Iр ВИЙ (Темп Multiphase	ературы) Potential	
Pressure Zone Name Outlet Momentum Backflow D Ba Preven Average	Рисунок e Outlet Thermal Backflow F Pressure Direction Spee ckflow Press t Reverse Flo	С 27 — Задал Radiation Reference Fran Gauge Press Profile Multip cification Meth ure Specificat ow Specification	ррју Сі ние входи species me Absolute sure (pascal) plier 1 hod Normal tion Total Pr	оse Не ных усло DPM e 7000 to Boundary ressure	Iр вий (темп Multiphase	ературы) Potential	
Pressure Zone Name Outlet Momentum Backflow D Ba Preven Averag Target	Рисунок e Outlet e Outlet Thermal Backflow F Pressure Direction Spee ckflow Press it Reverse Flo ge Pressure S	а 27 — Задал Radiation Reference Fran Gauge Press Profile Multip cification Meth ure Specificat ow Specification Rate	кррју С Ние входи Species me Absolute sure (pascal) plier 1 hod Normal tion Total Pr	оse Не ных усло DPM e 7000 to Boundary essure	Iр вий (темп Multiphase	ературы) Potential	
Pressure Zone Name outlet Momentum Backflow D Ba Preven Averag Target Turb	Рисунок e Outlet mail Backflow F Pressure Direction Spea ckflow Press t Reverse Flo ge Pressure S t Reverse Flo ge Pressure S t Mass Flow F	Radiation Reference Fran Gauge Press Profile Multip cification Meth- nure Specificat ow Specification Rate	ырру С ние входи Species me Absolute sure (pascal) plier 1 hod Normal tion Total Pr	оse Не ных усло DPM e 7000 to Boundary ressure	Iр вий (темп Multiphase	ературы) Potential	
Pressure Zone Name outlet Momentum Backflow D Ba Preven Averag Target Turb	Рисунок e Outlet e Outlet for Thermal Backflow F Pressure Direction Spec ckflow Press t Reverse Flo ge Pressure S t Reverse Flo ge Pressure S t Rass Flow F pulence	а 27 — Задал Radiation Reference Fran Gauge Press Profile Multip cification Methoure Specificat ow Specification Rate ification Methou	мрру С ние входи species me Absolute sure (pascal) olier 1 hod Normal tion Total Pr od Intensity	ose Не ных усло DPM e 7000 to Boundary ressure	Iр вий (темп Multiphase	epaтуры)	
Pressure Cone Name Outlet Momentum Backflow D Ba Preven Averag Target Turb	Рисунок e Outlet e Outlet Thermal Backflow F Pressure Direction Spec ckflow Press it Reverse Flo ge Pressure S it Reverse Flow F gulence Spec Backflow Tu	Radiation Reference Fran Gauge Press Profile Multip cification Meth rure Specificat ow Specification Rate ification Methor	ырру С ние входи species me Absolute sure (pascal) plier 1 hod Normal tion Total Pr od Intensity sity (%) 5	ose Не Hых усло DPM e 7000 to Boundary ressure and Length	Iр ВИЙ (Темп Multiphase	ературы) Potential	

Рисунок 28 – Задание выходных условий (давления)

Close

Help

Apply

Pressure (Dutlet						×
Zone Name							
outlet							
Momentum	Thermal	Radiation	Species	DPM	Multiphase	Potential	UDS
Backflow Tot	tal Tempera	ture (k) 300				•	
			Apply Cl	ose Help			

Рисунок 29 – Задание выходных условий (температуры)

. 10 № 3(53) o	c. 86–89
----------------	----------

Task Page	<
Solution Methods	
Pressure-Velocity Coupling	
Scheme	
Coupled	
Spatial Discretization	_
Gradient	^
Least Squares Cell Based	
Pressure	
Second Order	
Density	
Second Order Upwind	
Momentum	
Second Order Upwind	
Turbulent Kinetic Energy	
Second Order Upwind	
Specific Dissination Rate	-
Transient Formulation	
Non-Iterative Time Advancement	
Frozen Flux Formulation	
✓ Pseudo Transient	
Warped-Face Gradient Correction	
High Order Term Relaxation Options	
Structure Transient Formulation	
Default	

Рисунок 30 – Настройка метода решения задачи

Task Page	<
Solution Initialization	?
Initialization Methods	
 Hybrid Initialization Standard Initialization 	
More Settings) Initialize	
Patch	
Reset DPM Sources Reset LWF Reset Statisti	cs

Рисунок 31 – Проведение гибридной инициализации

Task Page <	
Run Calculation	
Check Case Update Dynamic Mesh	
Pseudo Transient Settings	
Fluid Time Scale	
Time Step Method Time Scale Factor	
Automatic 💌 1	
Length Scale Method Verbosity	
Conservative 0	
Parameters	
Number of Iterations Reporting Interval	
1000	
Profile Update Interval	
1	
Solution Processing	
Statistics	
Data Sampling for Steady Statistics	
Data File Quantities	
Solution Advancement	
Calculate	

Рисунок 32 – Запуск решателя с 1000 итераций

Таким образом, после завершения расчета, мы получили картины течения для различных параметров и их численные значения. Картины течения представлены на рисунках 33-36.















Рисунок 36 – Параметр Маха в критическом сечении

В заключение расчета переходим в модуль Results (Рисунок 37), где вычисляем тягу КРД (рисунок 39-40) путем задания новой переменной Variable 1 (Рисунок 38).



Рисунок 37 – Рабочее окно Results



Рисунок 38 – Задание переменной Variable 1

Outline	Variables	Expressions	Calculators	Turbo		
🗸 📠 Б	V k Expressions					
(0	Accumulated Time Step -1					
<u>v</u> 6	Current Time	Step -1	-1			
Vo	Reference Pro	essure 0[0 [Pa]			
v o	Sequence Ste	ep -1	-1			
<u>v</u> o	Specific Impu	lse <u>,</u> 77h	rust/massFlow()	()@inlet		
<u>v</u> o	Thrust	are	areaInt_x(Variable 1)@inlet+areaInt_x(Variable 1)@wall			
Vo	Time	0[s]			
v o	atstep	Aa	cumulated Time !	le Step		
v6	ctstep	Cu	Current Time Step			
<u>(</u> 6	pressure	Pre	Pressure - 101325 [Pa]			
<u>v</u> o	sstep	Sei	quence Step			
<u>v</u> o	t	Tin	ne			

Рисунок 39 – Добавление нового уравнения Thrust (тяга)

Details of Thrust		
Definition Plot Evaluate		
areaInt_x(Variable 1)@inlet+ areaInt_x(Variable 1)@wall		
Value	161727 [N]	
Apply	Peret	
Арріу	Keset	

Рисунок 40 – Вычисление тяги

Согласно Рисунку 40, мы видим, что значение тяги примерно 160 кН, что превышает принятое в ходе аналитического расчета значение – 140 кН. Такая погрешность может быть

вызвана несоответствием рассчитанного программой Ansys массового расхода и полученного аналитически. В таком случае сравним удельные импульсы. Для этого разделим тягу на массовый расход (Рисунок 42), посчитанный программой самостоятельно для данной задачи (Рисунок 41).

Flux Reports		×
Options Mass Flow Rate	Boundaries Filter Text 🔂 🔁 🗮	Results
 Total Heat Transfer Rate Radiation Heat Transfer Rate 	axis fluid inlet interior-fluid outlet wall	51.35393905639648
Save Output Parameter	•	▲ ► ► ► ► ► ► ► ► ► ► ► ► ► ► ► ► ► ► ►
	Compute Write Close Help	

Рисунок 41 – Параметр массового расхода на входной границе согласно программе Ansys

etails of Specific Impulse		
Definition Plot Evaluate		
Thrust/massFlow()@inlet		
/alue	3149.26 [m s^-1]	
Apply	Reset	

Рисунок 42 – Расчет удельного импульса

В результате получено значение удельного импульса 3150 м/с, что соответствует в пределах погрешности (1.2%) аналитическому значению 3188 м/с, согласно Рисунку 1 и Таблице 2.

Таким образом, можно считать расчет с помощью программного пакета Ansys верным, а это дает возможность опираться на графические отображения параметров в любой точки расчетной области. Исходя из этого, можно делать выводы о целесообразности создания испытываемого изделия, а также своевременно обнаружить недочеты в конструкции.

Список литературы

- Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера [Текст] : практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. - М. : УРСС, 2003. - 270 с.
- 2. Каратушин С.И. ANSYS Workbench в деталях машин [Текст] : учебное пособие [для вузов] / С. И. Каратушин [и др.]. Санкт-Петербург : [б. и.], 2019. 55 с.
- 3. Левихин А.А. Рабочие тела и топлива ракетных двигателей: учебное пособие / А.А. Левихин, Л.П. Юнаков; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2015. 78 с.
- Пинчук В.А., Сиротко В.А. Основы проектирования двигателей летательных аппаратов: Учеб. пособие. Ч.1. Обоснование и выбор рабочих параметров двигательной установки / В.А. Пинчук, В.А. Сиротко. Л., 1990. 60 с.
- 5. Пинчук В.А. Энергетический расчет ЖРД с нагнетательными системами питания / В.А. Пинчук; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2018. 90 с.
- 6. Побелянский А.В. Проектирование авиационных и ракетных двигателей с применением CAD/CAM/CAE систем: учебное пособие / А.В. Побелянский, А.А. Левихин; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2019. 62 с.
- Потехин Е.С., Филимонов Ю.Н. Основы проектирования двигателей летательных аппаратов: Учеб. пособие. Ч.З. Проектирование камер / Е.С. Потехин, Ю.Н. Филимонов. 1990. 99 с.
- Шаблий Л.С. Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических процессов двигателей и энергетических установок в ANSYS Fluent: учеб. пособие / Л.С. Шаблий, А.В. Кривцов, Д.А. Колмакова. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. – 108 с.

References

- Kaplun A.B. ANSYS in the hands of an engineer [Text]: a practical guide / A. B. Kaplun, E. M. Morozov, M. A. Olferyeva. - M.: URSS, 2003. - 270 p.
- Karatushin S.I. ANSYS Workbench in machine parts [Text]: a tutorial [for universities] / S. I. Karatushin [et al.]. - St. Petersburg: [b. and.], 2019. - 55 p.
- 3. Levikhin A.A. Working fluids and fuels of rocket engines: a tutorial / A.A. Levikhin, L.P. Yunakov; Baltic state tech. univ. St. Petersburg, 2015. 78 p.
- Pinchuk V.A., Sirotko V.A. Fundamentals of Aircraft Engine Design: Textbook. Part 1. Justification and Selection of Operating Parameters of the Propulsion System / V.A. Pinchuk, V.A. Sirotko. L., 1990. 60 p.
- Pinchuk V.A. Energy Calculation of Liquid Rocket Engines with Pressurized Fuel Systems / V.A. Pinchuk; Baltic State Tech. Univ. – St. Petersburg, 2018. – 90 p.

- Определение значения тяги и удельного импульса камеры ракетного двигателя средствами программного пакета ANSYS / Савиных А.А., Марк М.А., Погорелов М.А. и др.// Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2025. Т. 10 № 3(53) с. 86–89
- Pobelyansky A.V. Design of Aircraft and Rocket Engines Using CAD/CAM/CAE Systems: Textbook / A.V. Pobelyansky, A.A. Levikhin; Baltic State Tech. Univ. – St. Petersburg, 2019. – 62 p.
- 7. Potekhin E.S., Filimonov Yu.N. Fundamentals of Aircraft Engine Design: Textbook. Part 3. Design of Chambers / E.S. Potekhin, Yu.N. Filimonov. 1990. 99 p.
- Shabliy L.S. Computer Simulation of Typical Hydraulic and Gas-Dynamic Processes of Engines and Power Plants in ANSYS Fluent: textbook / L.S. Shabliy, A.V. Krivtsov, D.A. Kolmakova. - Samara: Publishing House of Samara University, 2017. - 108 p.