



Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України «КПІ»
Фізико-технічний інститут

РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ СОПЛА РІДИННОГО РАКЕТНОГО ДВИГУНА

Методичні рекомендації до виконання курсової роботи
з навчальної дисципліни «Основи конвективного теплообміну»
для студентів напряму підготовки 6.040204 «Прикладна фізика»
спеціалізації 6.04020401 – «Фізика новітніх джерел енергії»

Ухвалено
Методичною радою ФТІ НТУУ «КПІ»
16.02.2016 р., протокол № 2

Київ
НТУУ «КПІ»
2016

УДК 53.072

ББК 32.97:53

Розрахунок системи охолодження сопла рідинного ракетного двигуна: методичні рекомендації до виконання курсової роботи / уклад.: А.А. Халатов, Н.А. Панченко, А.Ж. Мейріс. – К: НТУУ «КПІ», 2016. – 34 с.

**РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ СОПЛА
РІДИННОГО РАКЕТНОГО ДВИГУНА**

Методичні рекомендації до виконання курсової роботи з навчальної дисципліни «Основи конвективного теплообміну» для студентів напряму підготовки 6.040204 «Прикладна фізика» спеціалізації 6.04020401 – «Фізика новітніх джерел енергії»

Укладачі: *А.А. Халатов – д-р техн. наук, проф., зав. кафедри Фізики енергетичних систем НТУУ “КПІ”*
Н.А. Панченко – асистент кафедри Фізики енергетичних систем НТУУ “КПІ”
А.Ж. Мейріс – асистент кафедри Фізики енергетичних систем НТУУ “КПІ”

Рецензент: *А.С. Коваленко – канд. техн. наук, доц. с.н.с Інституту технічної теплофізики НАН України*

Ухвалено: на засіданні кафедри фізики енергетичних систем НТУУ «КПІ» (протокол № 5/2015 від 09.12.2015 р.).

Ухвалено: на засіданні методичної ради Фізико-технічного інституту НТУУ «КПІ» (протокол № 2 від 16.02.2016 р.).

ЗМІСТ

Зміст.....	3
Передмова.....	4
Вступ.....	5
Мета та завдання.....	7
Завдання до курсової роботи.....	9
Рекомендації до виконання розділів курсової роботи.....	10
Вимоги до оформлення.....	26
Порядок захисту курсової роботи.....	29
Рекомендована література.....	31
Додаток А.....	32
Додаток Б.....	33

ПЕРЕДМОВА

Курсова робота «Розрахунок системи охолодження сопла рідинного ракетного двигуна» є складовою частиною учбового курсу «Основи конвективного теплообміну» для бакалаврів і містить завдання з найбільш складних розділів, що вимагають набуття навичок в практичних розрахунках теплових процесів.

Мета курсової роботи – закріплення теоретичних знань та отримання навичок розрахунку складного теплообміну в високотемпературних енергетичних установках. Робота включає розрахунок теплофізичних властивостей високотемпературного хімічно реагуючого потоку, визначення радіаційного та конвективного теплового потоків в заданому перетині надзвукового сопла Лаваля та розрахунок розмірів прохідного перетину для охолоджувача в системі охолодження для забезпечення надійного охолодження сопла РРД.

Для студентів навчального напрямку 6.040204 «Прикладна фізика» спеціалізації 6.04020401 – «Фізика новітніх джерел енергії»

ВСТУП

Рідинним ракетним двигуном (РРД) називають ракетний двигун, який створює силу тяги за рахунок витікання з його сопла продуктів згоряння рідкого палива.

Рідке пальне і рідкий окиснювач з баків під тиском подаються в камеру згоряння двигуна (наприклад, насосами), де в результаті згоряння палива (хімічної реакції) утворюються газоподібні продукти згоряння, нагріті до високої температури. Відпрацьовані гази розширюються в надзвуковому соплі Лавалю від тиску в камері до тиску у вихідному перерізі сопла і витікають в навколишнє середовище з великою швидкістю, створюючи тягу.

Одним з основних завдань при створенні високотемпературних РРД є забезпечення надійного охолодження камери згоряння і сопла Лавалю. У порівнянні з охолодженням інших теплових машин організація охолодження камер згоряння РРД значно ускладнюється у зв'язку з особливостями згоряння компонент палива і течії газу в соплі двигуна. Так як процес згоряння палива в РРД протікає при високій температурі і високому тиску, то ці чинники сприяють збільшенню теплового потоку до стінки камери згоряння і сопла.

Нагріті гази рухаються в каналі РРД з дуже великою швидкістю, яка в соплі Лавалю перевищує швидкість звуку. У зв'язку з цим різко зростає коефіцієнт конвективної тепловіддачі від гарячих продуктів згоряння до стінок камери двигуна, який значно перевищує теплові потоки в інших теплових машинах.

Висока температура згоряння палива в РРД визначає другу особливість теплових процесів в РРД - великі теплові потоки до стінки камери згоряння і сопла радіаційним теплообміном. Як відомо, радіаційний теплообмін пропорційний абсолютній температурі газу в ступені 4, тому при температурах порядку 2700-3500°C, що мають місце в камері згоряння радіаційні теплові потоки до стінки досягають 20-30% від загального

теплого потоку. Зі зниженням температури газу в соплі відносна частка радіаційного теплообміну знижується. Найбільш високі значення сумарного теплого потоку досягаються в критичному перетині сопла Лавалю. Організація знімання таких потужних теплових потоків представляє великі технічні труднощі.

Третя особливість організації охолодження РРД випливає з особливостей їх застосування. У переважній більшості випадків РРД застосовуються на безпілотних апаратах. Тому використовувати для охолодження двигуна спеціальну рідину нераціонально. Зазвичай стінки сопла і камери згоряння РРД охолоджують компонентами палива, пропускаючи їх далі в камеру згоряння (регенеративна система охолодження). Це викликає додаткові вимоги до паливних компонентів і до системи охолодження, так як кількість охолоджуючих компонентів, що проходять через тракт охолодження, обмежена.

Четверта особливість організації охолодження РРД полягає в тому, що наявність потужних теплових потоків в стінки камери згоряння і сопла призводить до того, що температура матеріалу стінок стає дуже високою. Це вимагає застосування в конструкції РРД жароміцних металів з високим коефіцієнтам теплопровідності і теплозахисних покриттів з низьким коефіцієнтом теплопровідності.

1. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ

Мета курсової роботи - розрахунок площі і розмірів прохідного перетину системи охолодження сопла рідинного ракетного двигуна, що забезпечують його надійне охолодження.

Найпростіша схема зовнішнього регенеративного охолодження наведена на рис.1. Охолоджуюча рідина надходить в колектор 1, а з нього - в охолоджуючий тракт. Проходячи по тракту, рідина охолоджує стінки сопла 3 і при цьому нагрівається. Нагріта рідина виходить з тракту через колектор 4 і далі через головку 5 потрапляє в камеру згоряння. Камера РРД охолоджується зазвичай самими компонентами, в якості яких можна використовувати як паливе, так і окиснювач.

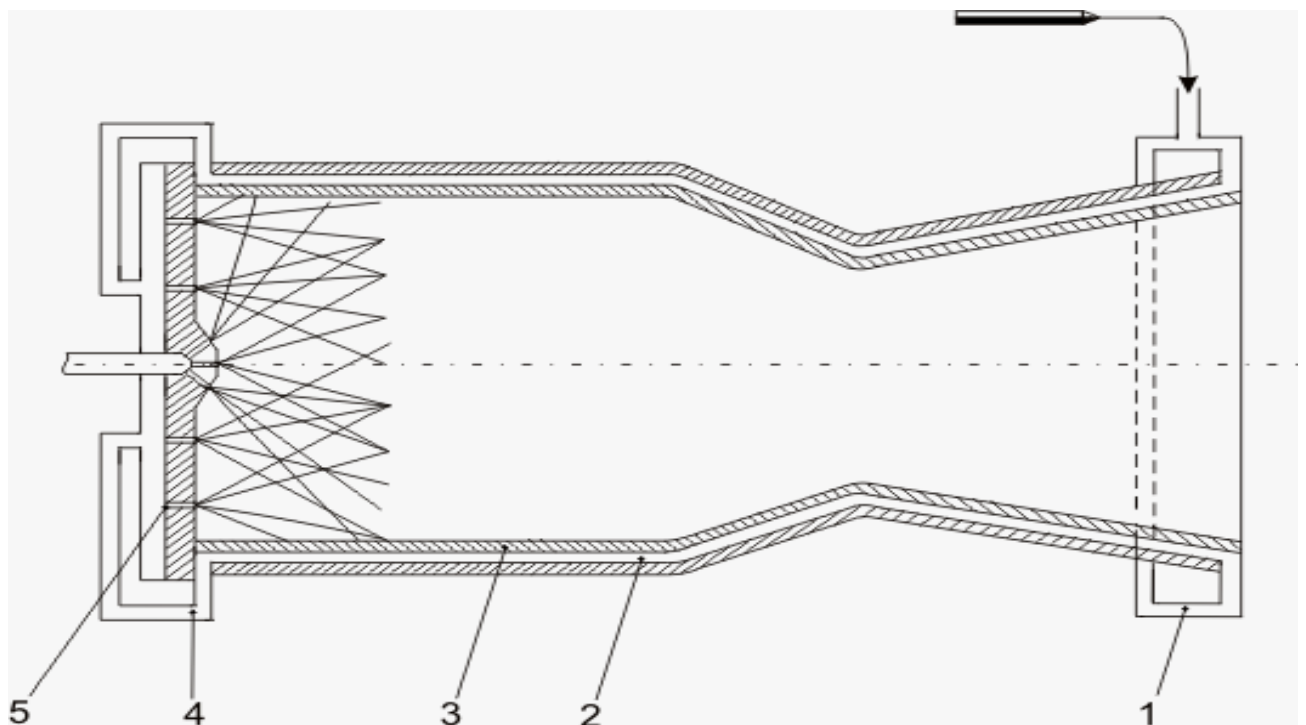


Рисунок 1 – Схема регенеративного охолодження РРД

1 – вхідний колектор охолоджуючої рідини, 2 – охолоджуючий тракт,
3 – стінка камери, 4 – вихідний колектор охолоджуючої рідини, 5 – головка камери двигуна.

Достатня міцність стінок камери згоряння і сопла рідинного ракетного двигуна забезпечується підтримкою її температури в певних межах за рахунок охолодження із зовнішнього боку. Необхідна інтенсивність охолодження (коефіцієнт тепловіддачі α_2) при заданій витраті охолоджувача G_2 (одного з компонентів палива або рідини) досягається підбором площі прохідного перетину кільцевого щілинного каналу для охолоджувача. Необхідно розрахувати висоту цього каналу δ_2 так, щоб температуру стінки T_{w1} , що омивається газом, можна було підтримувати в межах допустимих значень при стаціонарному режимі теплообміну.

У курсовій роботі необхідно вирішити такі **основні завдання**:

- 1) проаналізувати літературу і ознайомитися з принципом роботи РРД і системи його охолодження, основні відомості викласти в першому розділі роботи. В огляді повинно бути відображено: основні відомості про РРД, принцип роботи РРД, класифікація, термодинамічний цикл, особливості теплообміну і газодинаміки в камері згоряння і соплі, способи охолодження, пальне, що використовується;
- 2) розрахувати сумарний тепловий потік через стінку сопла q_Σ ;
- 3) визначити температурне поле в стінці сопла;
- 4) розрахувати підігрів охолоджувача ($\Delta t_{f2} = t''_{f2} - t'_{f2}$) та його температуру t''_{f2} на виході з ділянки охолодження, що розглядається;
- 5) визначити площу прохідного перетину і висоту каналу охолодження δ_2 .

2. ЗАВДАННЯ ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ

Назви завдань і вихідні дані для різних варіантів наведені в табл. 1, склад продуктів згорання — в табл.2, а прохідний переріз, що розглядається, наведено на рис. 2.

Вихідними даними для розрахунку є:

1) Температура T_{f1} , тиск p_1 , витрата G_1 та склад продуктів згорання з відомими значеннями середньої молекулярної маси μ_{cm}^* , газовою постійною

R_{cm} і відношенням теплоємностей $k = \frac{c_p}{c_v}$.

2) Геометричні розміри — діаметр прохідного перерізу сопла D , відстань від критичного перерізу x і довжина ділянки сопла ΔL (x і ΔL вимірюються вздовж твірної);

3) Матеріал і товщина δ_w стінки сопла (рис. 3).

4) Матеріал і товщина δ_{II} теплозахисного покриття стінки, що омивається газом (рис. 4).

5) Тип охолоджувача, його витрата G_2 , тиск p_2 і температура t'_{f2} охолоджувача на вході в ділянку, що розглядається.

3. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ РОЗДІЛІВ КУРСОВОЇ РОБОТИ

3.1 Вказівки та примітки

1. Продукти згоряння палива розглядаються як нереагуючий «заморожений» газ, тобто можливі зміни в складі газу за рахунок хімічних реакцій до уваги не приймаються.

2. Довжина ділянки, що розглядається, ΔL (рис. 2) передбачається досить малою, щоб вважати параметри уздовж неї постійними і рівними їх значенням в середньому перерізі.

3. При визначенні температури відновлення, коефіцієнт відновлення температури r в першому наближенні можна прийняти в межах $r = 0,85 - 0,90$.

4. Температура стінки сопла, що омивається газом, обмежується допустимою температурою матеріалу стінки: для сталі 08, IX18Н9Т і нікелю — 980°C ; алюмінію — 330°C ; міді — 830°C ; ZrO_2 — 2130°C ; Al_2O_3 — 1630°C ; ZrSi — 1330°C . З рідинного боку накладається обмеження, пов'язане з виникненням кипіння охолоджуючої рідини. Температура кипіння рідин, що розглядаються в завданнях 1 – 6 (гас, азотна кислота, етиловий спирт і вода), становить близько $200-250^{\circ}\text{C}$ при заданих тисках ($30 - 50 \text{ бар}$).

5. Властивості охолоджувача визначаються за даними табл. 3.

6. Необхідні властивості газового потоку розраховуються за рівняннями для газових сумішей і даними табл. 4.

7. Випромінювальна здатність ϵ_w стінки та поверхні захисного покриття прийняти рівними: ZrO_2 — 0,30; Al_2O_3 — 0,35; ZrSi — 0,32; IX18Н9Т — 0,45; сталь 08 — 0,50; нікель — 0,30.

8. Випромінювальна здатність газів визначається за даними рис. 5 – рис. 8.

9. Теплофізичні властивості захисного покриття визначаються за даними табл. 5.

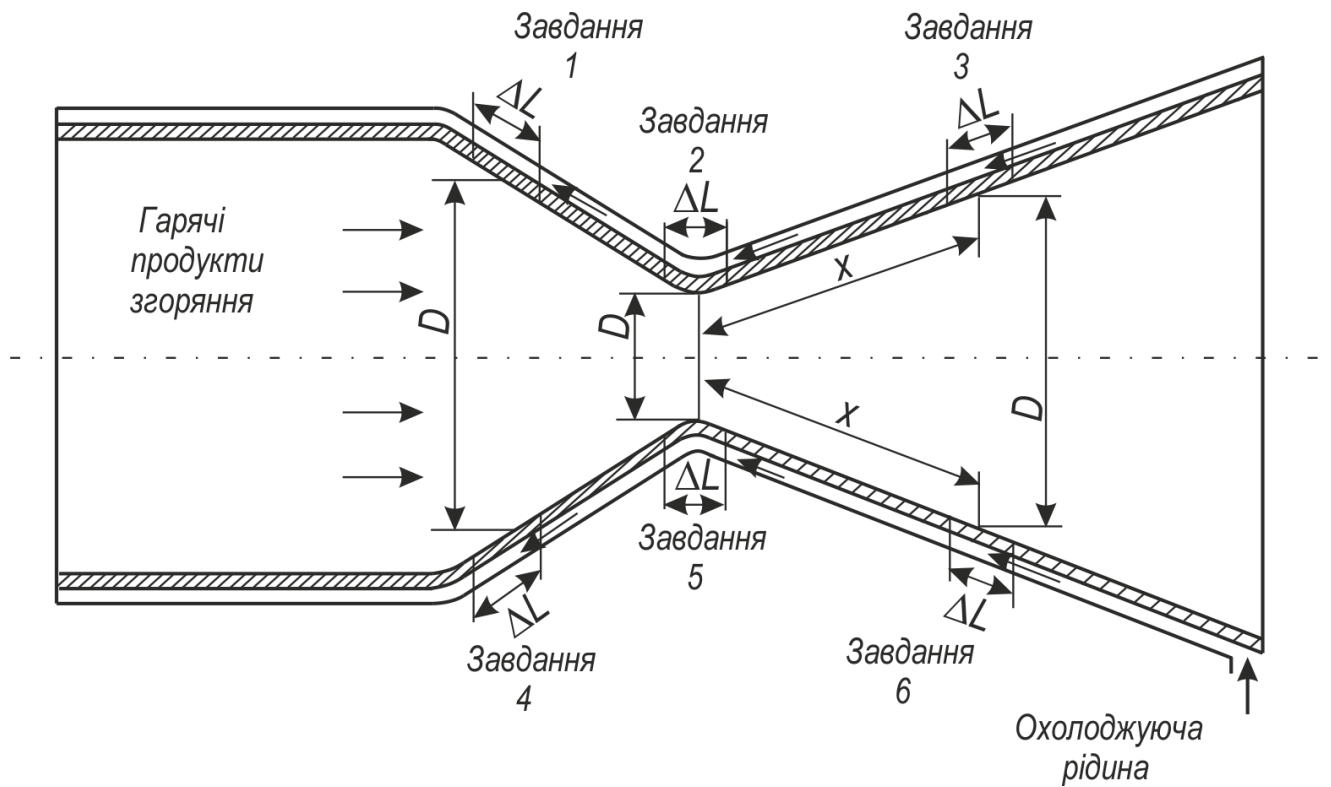


Рисунок 2 – Схема надзвукового сопла РРД

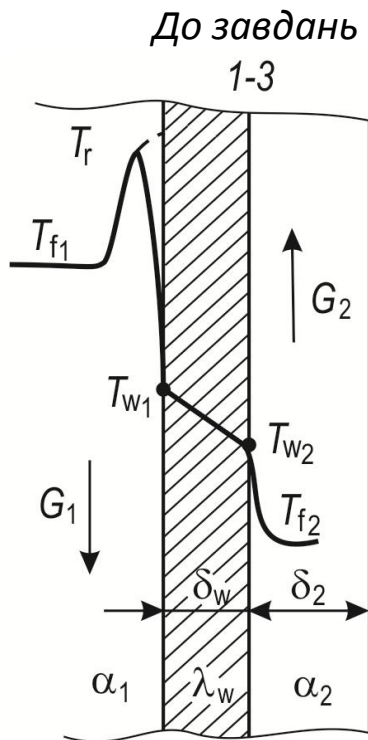


Рисунок 3 – Стінка сопла РРД без теплозахисного покриття

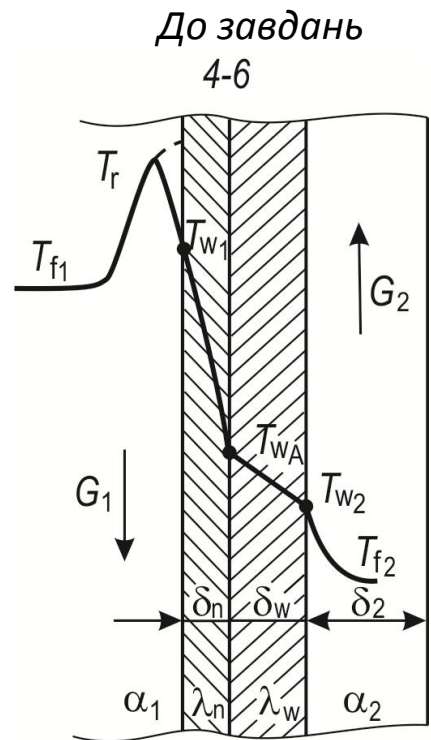


Рисунок 4 – Стінка сопла РРД з захисним покриттям

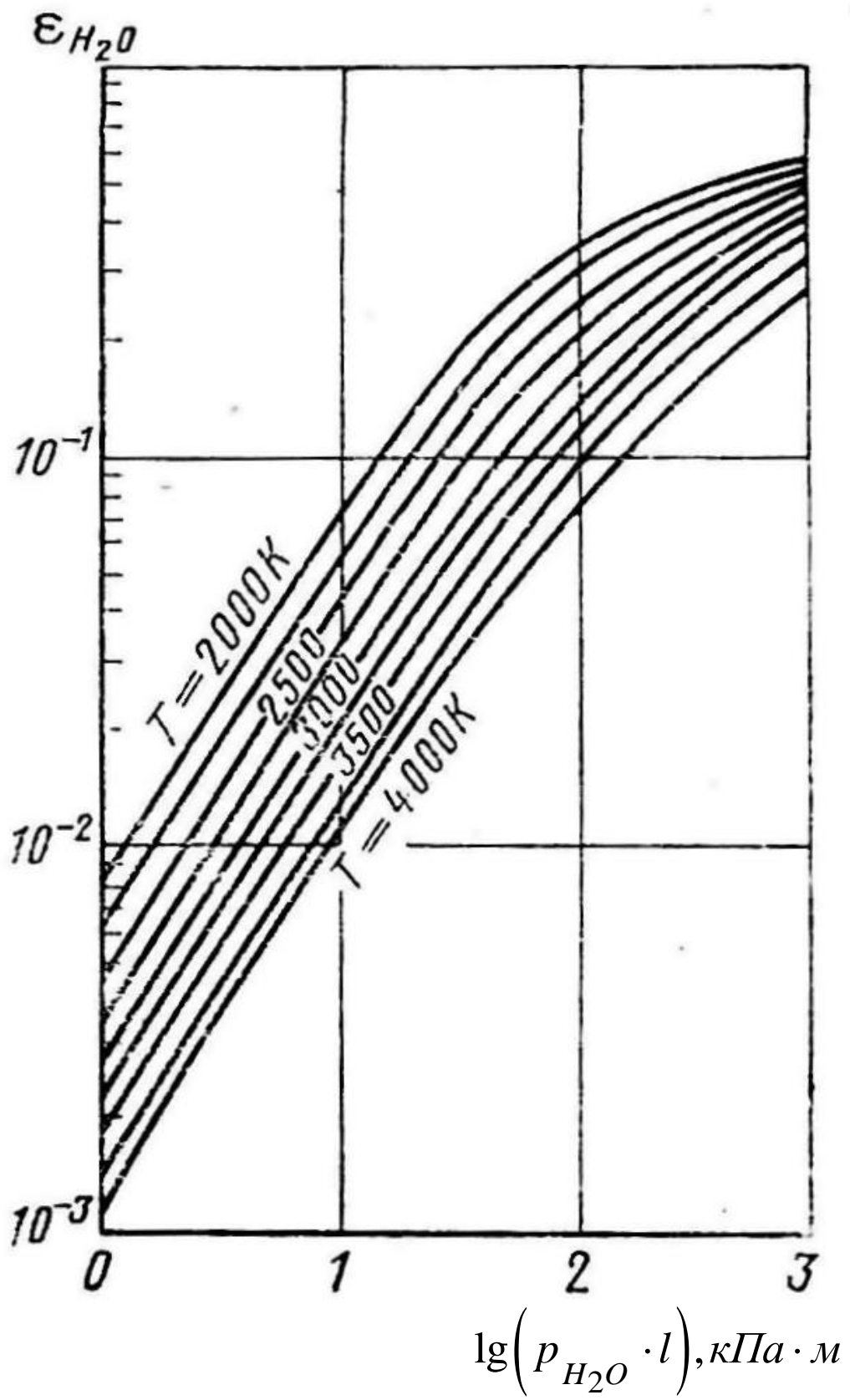


Рисунок 5 – Випромінювальна здатність H_2O [4]

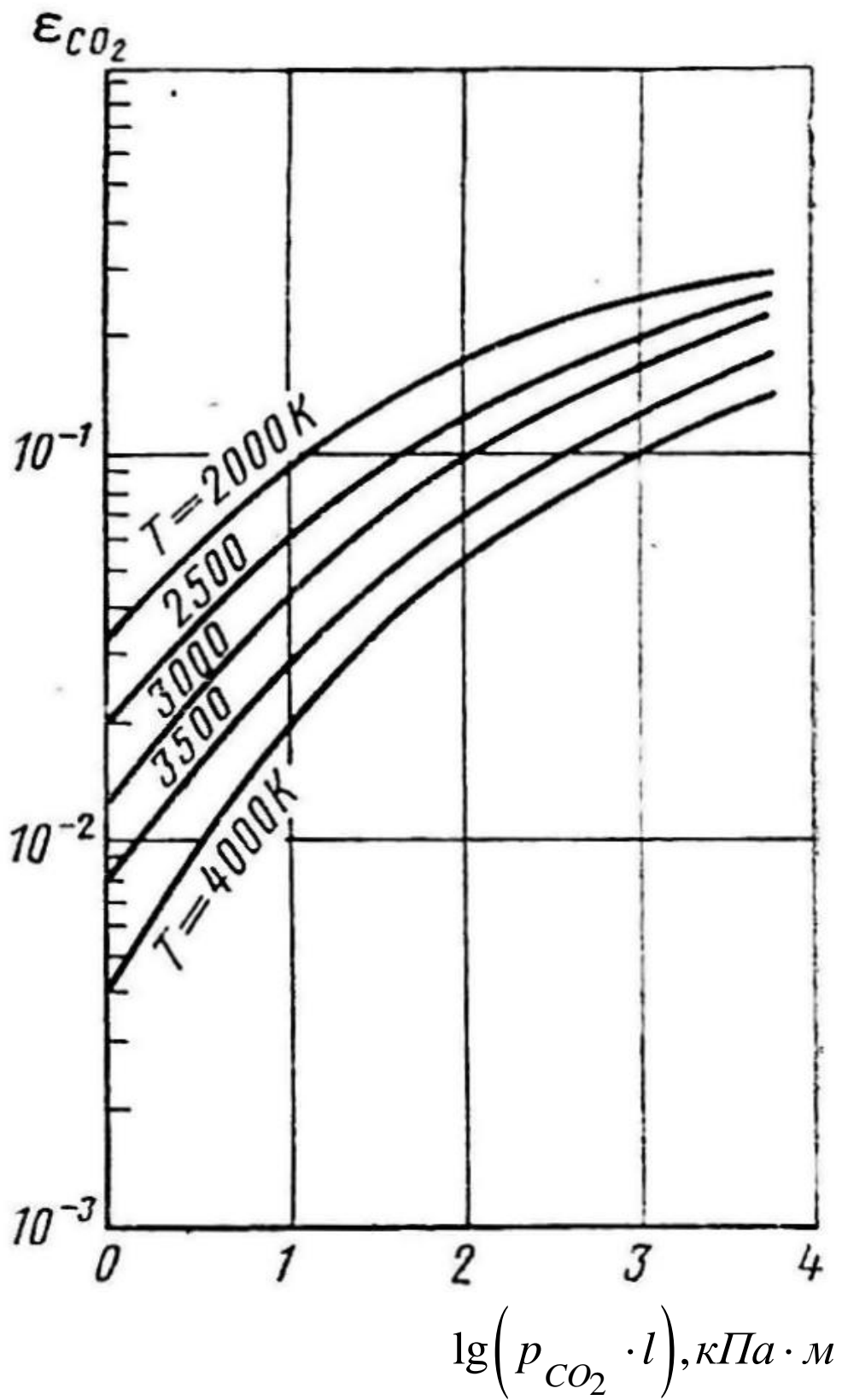


Рисунок 6 – Випромінювальна здатність CO₂ [4]

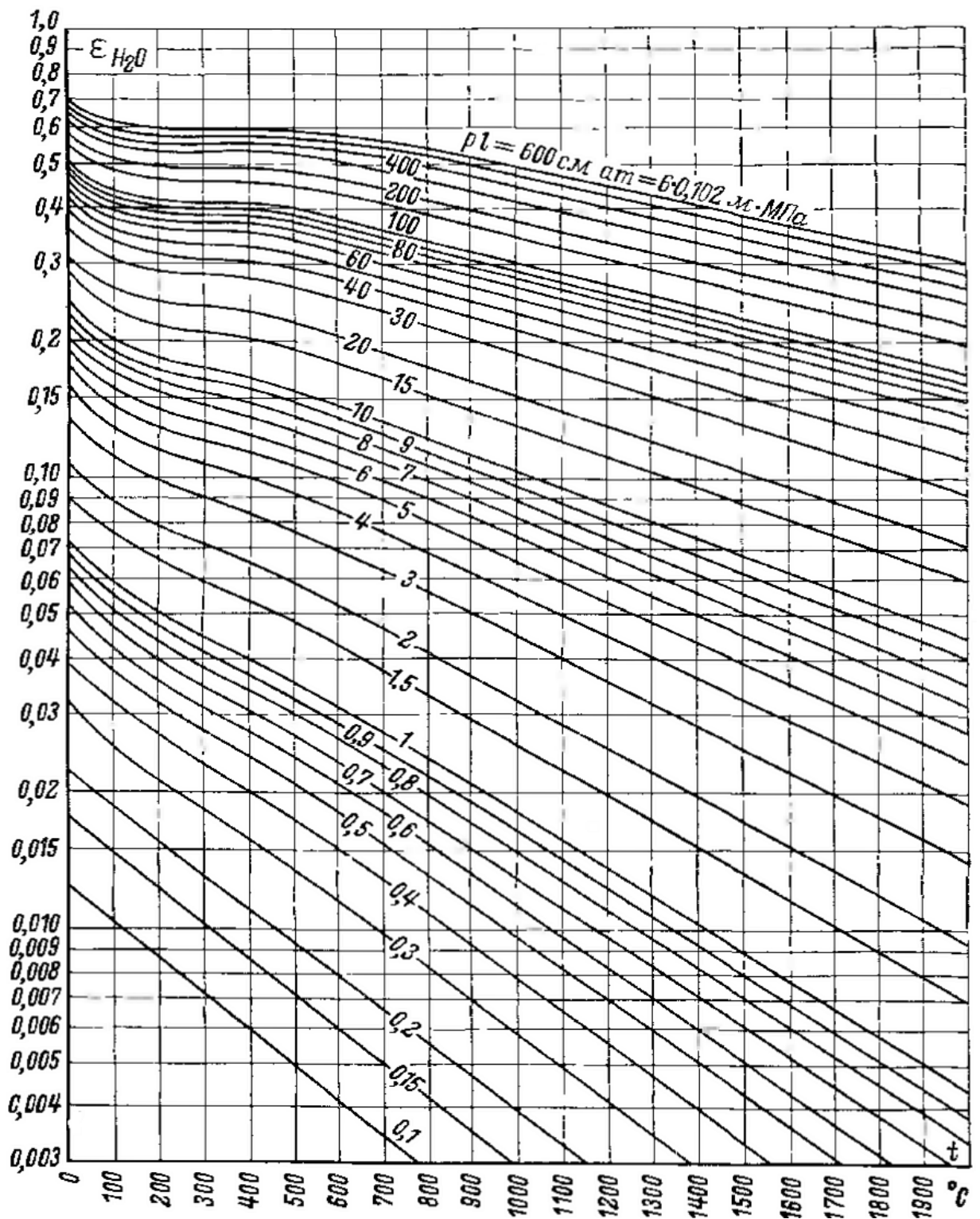


Рисунок 7 – Випромінювальна здатність H_2O при температурах, менших 2000К [3]

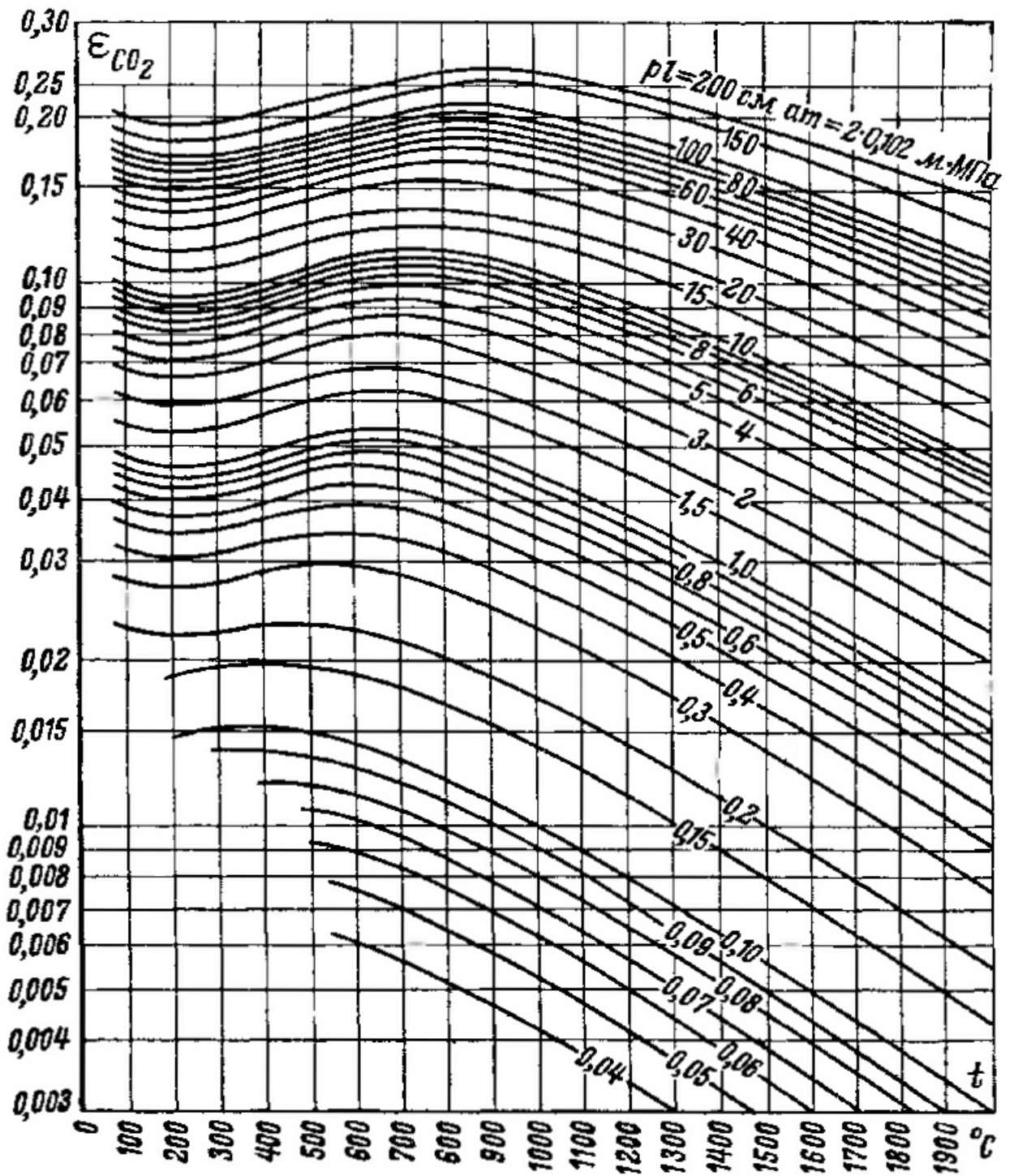


Рисунок 8 – Випромінювальна здатність CO₂ при температурах, менших 2000K [3]

Таблиця 1 – Вихідні дані для різних варіантів

Варіант	$T_{пл, К}$	$p_1, 10^5 \text{ н/м}^2$	$G_1, \text{ кг/с}$	Склад продуктів згоряння (см. табл. 2)	$D, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$\Delta L, \text{ мм}$	Матеріал стінки	$\delta_w, \text{ мм}$	Матеріал захисного покриття	$\delta_{пл}, \text{ мм}$	Охолоджуюча рідина (охолоджувач)	$G_2, \text{ кг/с}$	$p_2, 10^5 \text{ н/м}^2$	$t'_{f2}, \text{ }^\circ\text{C}$
Завдання 1. Розрахунок зовнішнього охолодження стінки без захисного покриття в одному з перерізів частини сопла РРД, що звужується															
1	2400	24,5	12,85	№ 1	0,14		20	Нікель	2,7			HNO ₃	9,78	29,4	19
2	2800	24,5	22,6	№ 2	0,20		15	ІХ18Н9Т	1,5			HNO ₃	18,08	29,4	19
3	3000	34,3	18,2	№ 3	0,17		15	сталь 08	2,4			вода	8,5	49	19
4	3300	29,4	18,4	№ 4	0,16		30	сталь 08	2,0			вода	15,0	49	18,5
5	3400	73,6	17,45	№ 5	0,12		25	Нікель	1,75			вода	15,0	49	8,5
6	2400	29,4	18,3	№ 6	0,15		25	сталь 08	1,75			вода	13,0	49	39,0
7	2800	34,3	13,5	№ 7	0,165		25	Нікель	2,2			вода	28,0	49	29,0
8	3000	39,8	21,5	№ 8	0,20		20	Нікель	1,8			вода	20,0	49	19,0
Завдання 2. Розрахунок зовнішнього охолодження стінки без захисного покриття в критичному перетині сопла РРД															
1	2130	13,5	13,2	№ 1	0,10		15	Нікель	2,5			HNO ₃	10,05	29,4	29
2	2520	13,8	21,7	№ 2	0,13		20	ІХ18Н9Т	1,5			HNO ₃	17,35	29,4	29
3	2700	19,3	17,9	№ 3	0,105		25	Нікель	2,2			вода	8,0	49	18
4	2990	16,5	18,2	№ 4	0,115		15	Нікель	2,5			вода	10,0	49	39,5
5	3060	40,8	17,4	№ 5	0,07		15	Нікель	1,4			вода	30,0	49	9,5
6	2080	16,1	9,67	№ 6	0,10		15	Нікель	2,0			вода	15,0	49	39,5
7	2480	18,9	13,5	№ 7	0,11		20	Нікель	1,7			вода	18,0	49	29
8	2670	21,8	19,5	№ 8	0,12		15	Нікель	1,5			вода	20,0	49	19

Завдання 3. Розрахунок зовнішнього охолодження стінки без захисного покриття в одному з перерізів частини сопла РРД, що розширюється

1	1485	2,35	13,65	№ 1	0,15	0,13	20	IX18H9T	1,4			HNO ₃	9,79	29,4	39
2	1700	1,57	22,2	№ 2	0,22	0,23	25	IX18H9T	2,0			HNO ₃	17,76	29,4	49
3	2070	4,41	20,3	№ 3	0,16	0,14	20	IX18H9T	1,75			вода	8,0	49	19
4	2460	2,39	18,5	№ 4	0,22	0,27	30	IX18H9T	3,2			вода	8,0	49	39
5	2020	3,92	17,75	№ 5	0,13	0,15	25	IX18H9T	1,75			вода	15,0	49	19
6	1265	1,96	9,90	№ 6	0,165	0,17	30	сталь 08	2,3			вода	17,0	49	39
7	1735	3,04	13,7	№ 7	0,17	0,15	25	сталь 08	1,85			вода	20,0	49	39
8	1760	2,55	18,75	№ 8	0,20	0,20	25	сталь 08	2,5			вода	15,0	49	29

Завдання 4. Розрахунок зовнішнього охолодження стінки із захисним покриттям в одному з перерізів частини сопла стінки РРД, що звужується

1	2400	24,5	12,85	№ 1	0,14		20	сталь 08	3,2	ZrSi	0,35	HNO ₃	9,78	29,4	39
2	2800	24,5	22,6	№ 2	0,20		15	сталь 08	2,7	Al ₂ O ₃	0,24	HNO ₃	18,08	29,4	29
3	3000	34,3	18,6	№ 3	0,17		20	сталь 08	1,8	ZrO ₂	0,20	вода	15,0	49	39
4	3300	29,4	18,4	№ 4	0,16		30	сталь 08	1,5	Al ₂ O ₃	0,18	вода	15,0	49	38,5
5	3400	73,6	17,45	№ 5	0,12		30	Алюміній	3,0	ZrO ₂	0,10	вода	15,0	49	28,5
6	2400	29,4	18,3	№ 6	0,15		30	сталь 08	2,0	Al ₂ O ₃	0,36	вода	13,0	49	49,5
7	2800	34,3	13,5	№ 7	0,165		30	Алюміній	4,5	Al ₂ O ₃	0,35	вода	28,0	49	39,5
8	3000	39,2	21,5	№ 8	0,20		25	Алюміній	5,0	ZrO ₂	0,115	вода	20,0	49	29

Завдання 5. Розрахунок зовнішнього охолодження стінки із захисним покриттям в критичному перетині сопла РРД

1	2130	13,5	13,2	№ 1	0,10		15	IX18H9T	2,4	ZrSi	0,27	HNO ₃	10,05	29,4	39,5
2	2520	13,8	21,7	№ 2	0,13		25	сталь 08	2,7	Al ₂ O ₃	0,40	HNO ₃	17,35	29,4	29
3	2700	19,3	17,9	№ 3	0,105		25	сталь 08	1,8	ZrO ₂	0,30	C ₂ H ₅ OH	7,58	39,2	19
4	2990	16,5	18,2	№ 4	0,115		20	сталь 08	1,5	Al ₂ O ₃	0,25	вода	10,0	49	39
5	3060	40,8	17,4	№ 5	0,07		30	Алюміній	5,0	ZrO ₂	0,10	вода	15,0	49	29
6	2080	16,1	9,67	№ 6	0,10		30	Алюміній	5,0	ZrO ₂	1,85	рідк. O ₂	7,18	44,1	-190
7	2480	18,9	13,5	№ 7	0,11		20	Мідь	4,0	Al ₂ O ₃	0,30	вода	18,0	49	39,5
8	2670	21,8	19,5	№ 8	0,12		20	Алюміній	5,0	ZrO ₂	0,175	вода	20,0	49	29,5

Завдання 6. Розрахунок зовнішнього охолодження стінки із захисним покриттям в одному з перерізів частини сопла РРД, що розширюється

1	1485	2,35	13,65	№ 1	0,15	0,13	20	IX18H9T	2,0	Al ₂ O ₃	2,50	керосин	3,26	29,4	19
2	1700	1,57	22,2	№ 2	0,22	0,23	20	сталь 08	3,0	ZrO ₂	1,40	керосин	4,44	29,4	19
3	2070	4,41	20,3	№ 3	0,16	0,14	20	сталь 08	1,8	Al ₂ O ₃	0,60	C ₂ H ₅ OH	8,60	39,2	19
4	2460	2,39	18,5	№ 4	0,22	0,21	30	IX18H9T	1,5	ZrSi	0,50	вода	8,0	49	39
5	2020	3,92	17,75	№ 5	0,13	0,15	30	сталь 08	2,7	ZrO ₂	0,33	вода	7,5	49	29
6	1265	1,96	9,90	№ 6	0,165	0,17	25	Алюміній	4,0	ZrO ₂	2,35	рідк. O ₂	7,35	44,1	-190
7	1735	3,04	13,7	№ 7	0,17	0,15	30	сталь 08	2,5	Al ₂ O ₃	1,30	вода	10,0	49	39,5
8	1760	2,55	18,75	№ 8	0,20	0,20	30	сталь 08	2,0	ZrO ₂	0,35	вода	1,0	49	28,5

Таблиця 2 – Склад продуктів згорання

№ складу	Паливо		кг окиснювача кг пального %	Об'ємні частки компонентів в продуктах згорання палива, r _i %										μ _{см} [*] г/моль	R _{см} Дж/кг К	k = $\frac{c_p}{c_v}$
	пальне	окиснювач		CO ₂	CO	H ₂ O	H ₂	N ₂	O ₂	OH	H	O	NO			
№ 1	керосин	HNO ₃	3,2	9,7	26,6	34,9	15,9	12,75	—	0,05	0,1	—	—	21,915	379,6	1,254
№ 2	керосин	HNO ₃	4,0	15,9	17,5	43,9	6,8	14,6	0,1	0,7	0,4	—	0,1	24,23	343,4	1,223
№ 3	C ₂ H ₅ OH	рідк. O ₂	1,36	11,3	26,4	45,8	14,4	—	0,06	0,98	1,01	0,05	—	21,10	394,4	1,226
№ 4	C ₂ H ₅ OH	рідк. O ₂	1,78	17,85	18,05	47,9	6,22	—	2,6	4,87	1,63	0,88	—	23,49	354,1	1,21
№ 5	керосин	рідк. O ₂	2,7	22,4	27,5	37,8	5,8	—	1,28	3,42	1,28	0,52	—	25,61	324,7	1,219
№ 6	рідк. H ₂	рідк. O ₂	2,88	—	—	35,95	63,8	—	—	0,02	0,23	—	—	7,76	1071,2	1,31
№ 7	рідк. H ₂	рідк. O ₂	3,6	—	—	44,5	54,3	—	0,2	1,0	—	—	—	9,34	890,7	1,253
№ 8	рідк. H ₂	рідк. O ₂	4,16	—	—	50,8	46,9	—	0,01	0,57	1,70	0,02	—	10,21	742,6	1,244

Таблиця 3 – Теплофізичні властивості деяких компонентів палива РРД і води [1]

Рідина	T, K	$t, ^\circ C$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\mu, 10^{-3} (\text{н}\cdot\text{с})/\text{м}^2$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$c_p, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	Pr
Керосин	273	0	825	3,0	0,156	1,84	35,4
		50	788	1,08	0,144	2,03	15,2
	373	100	750	0,47	0,133	2,22	7,85
		150	712	0,20	0,121	2,41	3,98
	473	200	676	0,12	0,109	2,60	2,85
Спирт	273	0	840	2,12	0,186	2,64	30,65
		50	750	0,76	0,193	3,31	13,05
	373	100	660	0,34	0,200	3,98	6,76
		150	570	0,16	0,207	4,69	3,64
	473	200	480	0,10	0,214	5,36	2,50
Азотна кислота	273	0	1500	1,59	0,334	1,84	8,77
		50	1420	0,67	0,324	1,88	3,90
	373	100	1340	0,40	0,312	1,95	2,50
		150	1260	0,27	0,295	2,01	1,835
	473	200	1180	0,20	0,274	2,09	1,525
Вода	273	0	1000	1,80	0,558	4,19	13,5
		50	990	0,56	0,644	4,19	3,64
	373	100	960	0,27	0,682	4,19	1,655
		150	915	0,18	0,678	4,19	1,11
	473	200	870	0,136	0,663	4,19	0,945
Рідкий O_2	83	-190	1176	0,253	0,1600	1,67	2,64
	103	-170	1079	0,178	0,1341	1,75	2,33
	123	-150	963	0,108	0,1082	1,90	1,985
	143	-130	783	0,0965	0,0826	2,67	3,12

Таблиця 4 – Теплофізичні властивості газів – основних компонент продуктів згоряння палив РРД [1]

Газ	T, K	$\mu, 10^{-6}$ (н·с)/м ²	$\lambda, 10^{-3}$ Вт/ (м·К)	$\mu_i^* \cdot c_{pi}$, Дж/(моль·К)
CO ₂	400	19,59	26,00	41,330
	600	27,06	40,53	47,359
	800	33,41	54,22	51,500
	1000	39,15	67,02	54,410
	1200	44,29	78,84	56,483
	1400	49,07	89,73	57,965
	1600	53,61	99,86	59,104
	1800	57,94	109,41	60,004
	2000	62,09	118,49	60,720
	2200	66,09	127,20	61,310
	2400	69,96	135,62	61,813
	2600	73,71	143,74	62,252
	2800	77,35	151,70	62,642
	3000	80,90	159,44	62,985
CO	400	22,17	33,33	29,363
	600	29,61	46,77	30,465
	800	35,84	58,99	31,922
	1000	41,53	70,72	33,211
	1200	46,82	81,86	34,195
	1400	51,78	92,45	34,957
	1600	56,48	102,50	35,510
	1800	60,97	112,04	35,945
	2000	65,28	121,17	36,280
	2200	69,43	129,84	36,553
	2400	73,45	138,17	36,779
	2600	77,35	146,21	36,959
	2800	81,14	154,00	37,118
	3000	84,83	161,53	37,256
H ₂ O	400	17,62	47,98	34,271
	600	26,45	76,20	36,331
	800	34,88	106,39	38,746
	1000	42,50	137,08	41,288
	1200	49,25	167,52	43,599
	1400	55,22	197,29	45,676
	1600	60,59	226,22	47,493
	1800	65,55	254,40	49,021
	2000	70,29	284,38	50,278
	2200	74,95	308,88	51,316
	2400	79,67	335,71	52,183
	2600	84,58	362,59	52,915
	2800	90,05	390,52	53,531
	3000	94,30	414,97	54,067

H ₂	400	10,79	227,14	29,200
	600	14,10	297,11	29,342
	800	17,02	363,14	29,636
	1000	19,68	428,37	30,226
	1200	22,14	493,73	31,013
	1400	24,46	559,38	31,884
	1600	26,66	625,04	32,755
	1800	28,76	690,18	33,576
	2000	30,78	754,46	34,312
	2200	32,73	817,60	34,978
	2400	34,61	879,40	35,581
	2600	36,44	939,81	36,130
	2800	38,22	999,02	36,628
	3000	39,96	1057,05	37,093
	N ₂	400	21,62	32,41
600		28,31	44,38	30,134
800		34,20	55,73	31,453
1000		39,56	66,57	32,726
1200		44,54	77,04	33,760
1400		49,21	87,01	34,555
1600		53,65	96,59	35,167
1800		57,89	105,72	35,640
2000		61,95	114,39	36,017
2200		65,88	122,68	36,318
2400		69,67	130,59	36,565
2600		73,36	138,21	36,774
2800		76,94	145,62	36,950
3000		80,44	152,78	37,101

Таблиця 5 – Теплофізичні властивості теплозахисних покриттів [1]

Покриття	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/ (кг·К)	λ , Вт/(м·К)
ZrO ₂	5000	0,733	1,15
Al ₂ O ₃	3200	1,172	2,73
ZrSi	3800	2,51	2,16

3.2 Визначення теплофізичних властивостей суміші продуктів згоряння

Визначальна температура – допустима температура T_w матеріалу стінки сопла або теплозахисного покриття. Основні співвідношення для газових сумішей:

– густина суміші $(\rho_{см})_w = p_1 / R_{см} T_w$ [кг/м³];

– теплоємність суміші $(c_{pсм})_w = \frac{1}{\mu_{см}^*} \sum_{i=1}^n r_i (c_{p_i} \mu_i^*)$ [Дж/(кг·К)]

– динамічний коефіцієнт в'язкості суміші $(\mu_{см})_w = \frac{\mu_{см}^*}{\sum_{i=1}^n r_i \cdot \frac{\mu_i^*}{\mu_i}}$ [Па·с]

– коефіцієнт теплопровідності суміші

$$(\lambda_{см})_w = \frac{1}{\mu_{см}^*} \sum_{i=1}^n r_i \cdot \mu_i^* \cdot \lambda_i \text{ [Вт/(м·К)].}$$

Позначення: ρ – густина компоненти; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості компоненти; μ_i^* – уявна молекулярна маса компоненти; λ – коефіцієнт теплопровідності компоненти; r_i – масова і об'ємна частка компоненти.

3.3 Розрахунок конвективного теплообміну

Для знаходження коефіцієнта конвективної тепловіддачі використовується рівняння подібності (Гухман, Ілюхін) [3]:

$$Nu_w = 0,0162 Re_w^{0,82} Pr_w^{0,82} \left(\frac{T_f^*}{T_w} \right)^{0,35}$$

Число Рейнольдса в заданому перерізі сопла $Re_w = \frac{wD}{(v_{см})_w}$,

де $(v_{см})_w = \frac{(\mu_{см})_w}{(\rho_{см})_w}$ [м²/с] та $w = \frac{G_1}{(\rho_{см})_w F}$ [м/с]; G_1 задано в табл. 1.

Число Прандтля $Pr_w = (\mu_{см})_w \frac{(c_{pсм})_w}{(\lambda_{см})_w}$

Температура загальмованого потоку визначається за наступною залежністю:

$$T_f^* = T_{f1} \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right) \text{ [K]}$$

$$M = \frac{w}{a_{kp}} = \frac{w}{\sqrt{kR_c T_{f1}}}, \text{ де } M \text{ – число Маха в заданому перерізі сопла;}$$

$$w = \frac{G_1}{(\rho_{cm})_{f1} F} \text{ [м/с]}, \quad F \text{ [м}^2\text{]} \text{ – площа прохідного перетину сопла.}$$

Густина суміші при температурі потоку T_{f1} :

$$(\rho_{cm})_{f1} = \frac{P_1}{R_{cm} T_{f1}} \text{ [кг/м}^3\text{]};$$

Знаючи число Nu_w визначається коефіцієнт конвективної тепловіддачі:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_w (\lambda_{cm})_w}{D} \text{ [Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}];$$

Температура відновлення:

$$T_r = T_{f1} \left(1 + r \frac{k-1}{2} M^2\right) \text{ [K]}, \text{ де } r \text{ – коефіцієнт відновлення (Вказівки та}$$

примітки, п.3).

Густина конвективного теплового потоку:

$$q_K = \alpha_1 (T_r - T_w) \text{ [Вт/м}^2\text{]}.$$

3.4 Розрахунок радіаційного теплообміну

Основний внесок в радіаційний теплообмін вносять трьохатомні газы CO_2 та H_2O , випромінюванням інших газів можна знехтувати.

Густина радіаційного теплового потоку визначається за наступною залежністю [4]:

$$q_P = c_o \varepsilon_{np} \left[\varepsilon_2 \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - A_{2(T_w)} \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \text{ [Вт/м}^2\text{]},$$

де:

$C_o = 5,67$ [Вт/(м²·К⁴)] – постійна Стефана-Больцмана

$\varepsilon_{np} = \varepsilon_w [1 + (1 - \varepsilon_w)(1 - \varepsilon_z)]$ – приведена випромінювальна здатність газу (ε_w знаходиться за даними п.7, *Вказівки та примітки*),

$\varepsilon_z = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_{CO_2} \cdot \varepsilon_{H_2O}$ – випромінювальна здатність газової суміші (значення ε_{CO_2} та ε_{H_2O} визначається за даними рис. 5, де $l = 0,9 \cdot D$),

$A_{z(T_w)}$ – поглинальна здатність газу при температурі стінки T_w ;

$A_{z(T_w)} \approx \varepsilon_{z(T_w)}$ при температурі T_w за теоремою Кирхгофа [3].

Розрахунок здійснюється за графіками рис.7 та рис.8. Зауваження: звернути увагу на розмірність.

3.5 Розрахунок сумарної густини теплового потоку

$$q_{\Sigma} = q_K + q_P \text{ [Вт/м}^2\text{]}$$

Для знаходження величини T_{w2} використовуємо рівняння стаціонарної теплопровідності через одношарову або двошарову плоску стінку, в залежності від завдання (рис. 2 або 3). Густина теплового потоку:

$$q_{\Sigma} = \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{\delta_{\Pi}}{\lambda_{\Pi}}} \text{ [Вт/м}^2\text{]}$$

звідки випливає:

$$T_{w2} = T_{w1} - q_{\Sigma} \left(\frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{\delta_{\Pi}}{\lambda_{\Pi}} \right) \text{ [К]}.$$

Для того, щоб температура T_{w2} відповідала відсутності кипіння охолоджувача на стінці (*Вказівки та примітки, п.4*), дозволяється збільшити товщину теплозахисного покриття.

Коефіцієнт конвективної тепловіддачі від стінки до охолоджувача:

$$\alpha_2 = \frac{q_{\Sigma}}{T_{w2} - T_{f2}} \text{ [Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}]$$

3.6 Розрахунок висоти кільцевого каналу системи охолодження

δ_2 (рис. 1)

Для цього використовуємо рівняння подібності для теплообміну від стінки сопла до охолоджувача в кільцевому зазорі [3]. В якості визначального розміру береться величина $2\delta_2$.

$$Nu_{f_2} = 0,021 Re_{f_2}^{0,8} Pr_{f_2}^{0,4};$$

Значення ρ , μ , λ , c_p , Pr визначаються при температурі t'_{f_2} (табл.1).

Перепишемо рівняння подібності в наступному вигляді:

$$\frac{\alpha_2 2\delta_2}{\lambda_{f_2}} = 0,021 \left(\frac{w 2\delta_2}{\nu_{f_2}} \right)^{0,8} Pr_{f_2}^{0,4},$$

де

$$w = \frac{G_2}{\rho_{f_2} F} \quad [м/с] \text{ – середня швидкість охолоджувача;}$$

$F = \pi D_1 \delta_2$ $[м^2]$ – площа прохідного перерізу каналу охолодження, де
 $D_1 = D + 2\delta_w + 2\delta_{II}$ – зовнішній діаметр.

Підставимо значення швидкості в рівняння подібності:

$$\frac{\alpha_2 2\delta_2}{\lambda_{f_2}} = 0,021 \left(\frac{2G_2}{\nu_{f_2} \rho_{f_2} \pi D_1} \right)^{0,8} Pr_{f_2}^{0,4}$$

Тоді з останнього виразу можна знайти висоту кільцевого каналу:

$$\delta_2 = 0,021 \frac{\lambda_{f_2}}{2\alpha_2} \left(\frac{2G_2}{\mu_{f_2} \pi D_1} \right)^{0,8} Pr_{f_2}^{0,4} \quad [м].$$

3.7 Розрахунок підігріву охолоджувача

Визначимо підігрів охолоджуючого теплоносія за наступним виразом:

$$\Delta T = \frac{Q}{G_2 C_{p_2}} = \frac{q_{\Sigma} F}{G_2 C_{p_2}} = \frac{q_{\Sigma} \pi D_1 \Delta L}{G_2 C_{p_2}} \quad [K].$$

4 ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ

Курсова робота повинна бути виконана у відповідності ДСТУ 3008-95. Основні витримки і доповнення представлені нижче.

Курсова робота повинна набиратися в текстовому редакторі *Microsoft Word 97-2003*, редактор формул *MathType 5.0* та вище. Мова оформлення курсової роботи – **українська**. Шрифт – Times New Roman 14 пт, вирівнювання по ширині, перший ряд – відступ 1,25 см. Міжрядковий інтервал – 1,5.

4.1 Структура курсової роботи

Текст курсової роботи повинен включати наступні складові (вказуються в порядку їх появи):

- 1) титульний лист (додаток А) з підписом виконавця;
- 2) лист завдання (додаток Б);
- 3) зміст;
- 4) перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів;
- 5) вступ;
- 6) літературний огляд;
- 7) вихідні дані;
- 8) результати розрахунку;
- 9) висновки по роботі;
- 10) перелік посилань.

Зміст курсової роботи розбивається на розділи з відповідними їм заголовками.

4.2 Нумерація сторінок

Нумерація сторінок наскрізна, номери сторінок ставляться вгорі сторінки праворуч.

4.3 Якість матеріалів

Розміри і чіткість зображення всіх символів в тексті, формулах, таблицях, на малюнках і графіках повинні гарантувати гарне їх відтворення.

Математичні формули повинні набиратися на комп'ютері за допомогою відповідних редакторів формул. Надписи і позначення в ілюстраціях повинні бути чіткими, розбірливими. Розмір шрифту для написів і позначень – **не менше 12 пт.**

4.4 Межі розташування тексту

Весь текст курсової роботи повинен розміщуватися в межах, визначених наступними параметрами сторінки:

розмір паперу	A4, орієнтація книжна;
верхнє поле	2,5 см;
нижнє поле	2,5 см;
ліве поле	3,0 см;
праве поле	1,5 см.

4.5 Особливості оформлення рисунків

Прикладом оформлення рисунків і надписів під рисунками служить рис. 1. Підписи під рисунками, що пояснюють зміст рисунків, обов'язкові. Вони набираються шрифтом 14-го розміру і вирівнюються по середині. Всі лінії на рисунках повинні бути достатньої товщини, щоб «не загубитися».

4.6. Оформлення таблиць

Назви таблиць обов'язкові і повинні розташовуватися над відповідними таблицями. До таблиць можуть бути дані примітки, що пояснюють зміст і табличні символи.

4.7. Особливості оформлення математичних формул і символічних позначень змінних

Розмір шрифту для символів при наборі змінних в формулах і тексті – 14; розмір індексів при змінних, розмір показників ступеня і т.п. – не менше 12 пт. При написанні чисел дробову частину від цілої відокремлювати комою, а не крапкою.

Написання символів

- Усі символи грецького алфавіту мають звичайне (пряме) написання (α , β , Σ , Π ...).

- Символи латинської абетки, що використовуються
 - в іменах змінних ($p, v, T, w \dots$), в іменах індексів ($i, j, k \dots$) – курсивного написання;
 - в позначеннях математичних функцій ($\sin, \exp, \ln \dots$), чисел подібності ($Nu, Re \dots$), хімічних формулах (H_2O) – звичайного (прямого) написання.

- Розміри спеціальних математичних символів (підсумовування, інтегрування і т.п.) – на 2 пт більше розміру символу змінної в формулах.

- Індокси, що позначають скорочення двох або декількох українських слів, набирають буквами українського алфавіту прямим шрифтом з точкою між скороченнями («живильна вода» – ж.в, «початок кипіння» – п.к, «критична точка» – кр.т). Скорочення від одного слова набирають разом (приклади: $C_{тр}$ – коефіцієнт тертя; $T_{ср}$ – середня температура і т.п.).

Числові значення завжди, і в формулах, і в індексах, набираються звичайним (прямим) шрифтом.

Слід чітко розрізняти написання дефісу (-) та тире (–).

Формули нумеруються цифрами у правого краю.

СПИСОК ПОЗНАЧЕНЬ (приклад оформлення)

$T_{ср}$ – середня температура, К;

Індокси:

i – порядковий номер.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ (приклад оформлення)

1. Исаченко В. П. Теплопередача [Текст] / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.

2. Коваленко Г. В. Сравнение различных способов интенсификации теплообмена на цилиндрических поверхностях [Текст] / Г. В. Коваленко, А. Ж. Мейрис // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 3. – С. 58–60. – ISSN 0204-3602.

5. ПОРЯДОК ЗАХИСТУ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Курсова робота виконується протягом семестру і захищається до складання іспиту з дисципліни "Основи конвективного теплообміну". Не пізніше ніж за два тижні до захисту студент подає курсову роботу на перевірку. Успішний захист курсової роботи є необхідною умовою допуску до іспиту. Здача електронного варіанту курсової роботи обов'язкова, для цього його необхідно направити на електронну пошту викладача або здати матеріали в електронному вигляді на флеш-носії на кафедру ФЕС.

Курсова робота оцінюється за наступними критеріями:

- своєчасне виконання етапів курсової роботи;
- своєчасне завершення курсової роботи та здача її на перевірку;
- правильність розрахунків студента відповідно до заданого варіанту;
- дотримання вимог до оформлення курсової роботи;
- здатність зрозуміти суть запитань і сформулювати правильні відповіді

на них.

Максимальна кількість балів – 100.

Оцінка ECTS, яку студент отримує після виконання курсової роботи визначається відповідно до рейтингу студента, який складається з отриманих під час захисту КР балів.

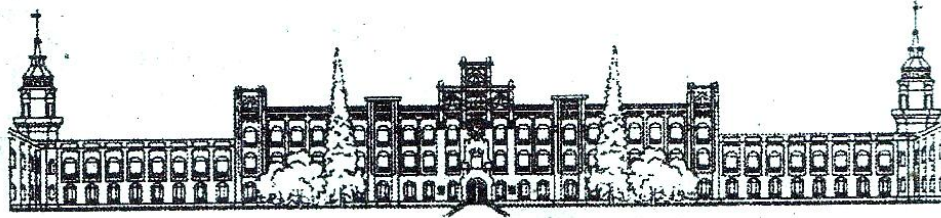
Сумарний рейтинг	Оцінка ECTS і позначення	Національна шкала
95 - 100	A - відмінно	відмінно (5)
85 - 94	B – дуже добре	добре (4)
75 - 84	C - добре	добре (4)
65 - 74	D - задовільно	задовільно (3)
60 - 64	E – достатньо (мінімальний критерій)	задовільно (3)
< 60	F _x незадовільно	незадовільно (2)
Рейтинг за семестр ≤ 30 або не виконані інші умови допуску до екзамену	F	не допущений

Контрольні запитання:

1. Перерахуйте прості і складні види теплообміну.
2. Дайте визначення густини теплового потоку.
3. Дайте визначення конвекції.
4. Дайте визначення масової швидкості.
5. Дайте визначення коефіцієнта теплопровідності та тепловіддачі.
6. Вкажіть основні особливості радіаційного теплообміну від газу до стінки.
7. Фізичний зміст чисел подібності Nu , Re , Pr .
8. Вкажіть основні особливості тепловіддачі при великій швидкості газу в надзвукових соплах.
9. Поясніть основні закони радіаційного теплообміну (Віна, Планка, Кірхгофа).
10. Вкажіть основні особливості теплообміну в камері РРД.
11. Принцип роботи РРД. Термодинамічний цикл РРД.
12. Порядок розрахунку системи охолодження сопла РРД.
13. Як впливають тиск і температура в камері згоряння на тепловий потік в стінки камери і сопла двигуна?
14. Опишіть основні схеми охолодження РРД.
15. Які форми охолоджуючих трактів ви знаєте?
16. Дайте визначення внутрішнього охолодження. Які способи внутрішнього охолодження ви знаєте?
17. У чому недоліки застосування пористих матеріалів для використання в системі внутрішнього охолодження?
18. Який вид охолодження РРД називається змішаним охолодженням?
19. Наведіть приклади використання змішаного охолодження.
20. Який рівень температури і тиску в сучасних РРД.
21. Чому потрібно уникати кипіння охолоджувача?
22. Класифікація палив РРД.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Сборник задач по термодинамике и теплопередаче [Текст] / А.В. Болгарский, В.И. Голдобеев и др. – М.: Изд. Высш. Школа, 1972. – 302 с.
2. Справочник по теплопередаче [Текст] / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 414 с.
3. Исаченко В.П. Теплопередача [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
4. Алемасов В.Е. Теория ракетных двигателей [Текст] / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегаллин, А.П. Тишин. М.: Машиностроение, 1980. – 535 с.
5. Синярев Г.Б. Жидкостные ракетные двигатели [Текст] / Г.Б. Синярев, М.В. Добровольский. – М.: Изд. Оборон. Пром., 1957. – 560с.



Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
Фізико-технічний інститут
Кафедра «Фізики енергетичних систем»

Курсова робота
з навчальної дисципліни «Основи конвективного теплообміну»

**Розрахунок системи охолодження сопла рідинного ракетного
двигуна**

(Варіант № __, завдання № __)

Виконав: студент 3-го курсу
групи _____

Перевірили:
Халатов А. А.
Панченко Н.А

Київ 2016 р.

Національний технічний університет України "КПІ"

(назва вищого навчального закладу)

Кафедра _____

Дисципліна _____

Спеціальність _____

Курс _____ Група _____ Семестр _____

ЗАВДАННЯ
на курсовий проект (роботу) студента

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) _____

2. Строк здачі студентом закінченого проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці) _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) _____

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів курсового проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1	Отримання теми та завдання	2й тиждень	
2	Підбір та вивчення літератури. Написання розділу 1	7й тиждень	
3	Розрахунок теплофізичних властивостей	8й тиждень	
4	Розрахунок конвективного теплообміну	9й тиждень	
5	Розрахунок радіаційного теплообміну	10й тиждень	
6	Розрахунок перетину для проходження охолоджувача	11й тиждень	
7	Розрахунок температури охолоджувача	12й тиждень	
8	Подання КР на перевірку	14й тиждень	
9	Захист КР	16й тиждень	

Студент _____

(підпис)

Керівник _____

(підпис)

_____ (прізвище, ім'я, по батькові)

“ _____ ” _____ 2016 р.