



Институт технічної теплофізики НАНУ

**Смольченко Д.А., Дядюшко Є.В.,  
Дейнеко А.І.**

**ТЕРМОГІДРАВЛІЧНИЙ АНАЛІЗ І  
ПРОЕКТУВАННЯ ТЕРМОВАКУУМНОЇ КАМЕРИ  
ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ ОРБІТАЛЬНИХ СУПУТНИКІВ**

**XII Міжнародна онлайн конференція «ПРОБЛЕМИ ТЕПЛОФІЗИКИ ТА  
ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ», 26-27.10.2021, Київ, ІТТФ**

# **ЗМІСТ**

- 1. Конструкції термовакумних камер (ТВК).**
- 2. Проектні параметри та визначення концепції ТВК**
- 3. Розробка і верифікація моделі ТВК для проектування**
- 4. Оптимальний вибір і обґрунтування параметрів ТВК на засаді теплогідравлічних розрахунків**
- 5. Висновки.**

# Терміни та визначення

3

**Термовакуумна камера (ТВК) або камера глибокого вакууму (КГВ) - імітатор умовного космосу, випробувальна вакуумна камера;**

**Кріоекран (КЕ) – циліндрична камера з передньою і задньою торцевими частинами, що складається з каналів охолодження, плавниками між ними і колекторами, по яким азот з зовні ТВК подається в канали охолодження з низу наверх, а суміш рідкого азоту і його пари відводиться верхніми колекторами назовні ТВК;**

**Канал охолодження КЕ – труба, виготовлена екструзією разом з плавниками ,що з'єднує нижні і верхні колектори, по якій в процесі кипіння рухається суміш рідкого азоту і його пари для охолодження всього, що знаходиться в середині ТВК, включно його корпус;**

**Плавники КЕ – пластини, розташовані між каналами охолодження і з'єднанні з ними для збирання частини теплового навантаження і теплопередачі його каналам охолодження;**

**Колектор – труба великого діаметру, розташована знизу для живлення каналів охолодження КЕ рідким азотом, або зверху для відводу із КЕ суміші газоподібного та рідкого азоту;**

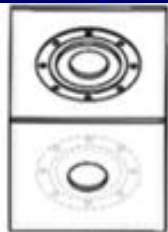
**Теплове навантаження – питомий тепловий потік ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), що падає на внутрішню поверхню КЕ (циліндрична частина і 2 торця) вище рівня столу**

**Об'єкт дослідження (випробувань) – паралелепіпед вагою до 50 кг, що розташовується на столі ТВК, тепловий стан якого враховується тільки при заохолодженні ТВК і в цій роботі не враховується при теплових навантаженнях на внутрішню поверхню КЕ;**

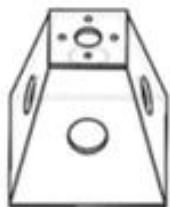
**Радіаційні екрани – тонкі металеві листи металу з низьким коефіцієнтом випромінювання, які розташовані між КЕ і корпусом ТВК і зменшують приток теплоти зовні ТВК, а також збільшують температуру зовнішньої поверхні ТВК.**

**Контур охолодження ТВК – група каналів охолодження з плавниками між верхнім і нижнім колекторами для двох циліндричних (правий і лівий контури) і двох торцевих (передній і задній) частин КЕ;**

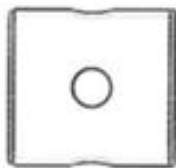
**Неізотермічність – різниця температур на КЕ між найвищою та найнижчею температурою.**



КВАДРАТНА



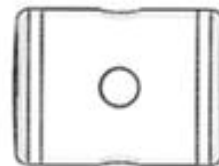
ПІРАМІДНА



ЦИЛІНДРИЧНА  
З ПЛАСКИМИ  
ТОРЦЯМИ



КОНІЧНА



ЦИЛІНДРИЧНІ З  
ЕЛІПТИЧНИМИ  
ТОРЦЯМИ



ЕЛІПСОЇДНА



СФЕРИЧНА

## Широко застосовувані форми термовакuumних корпусів



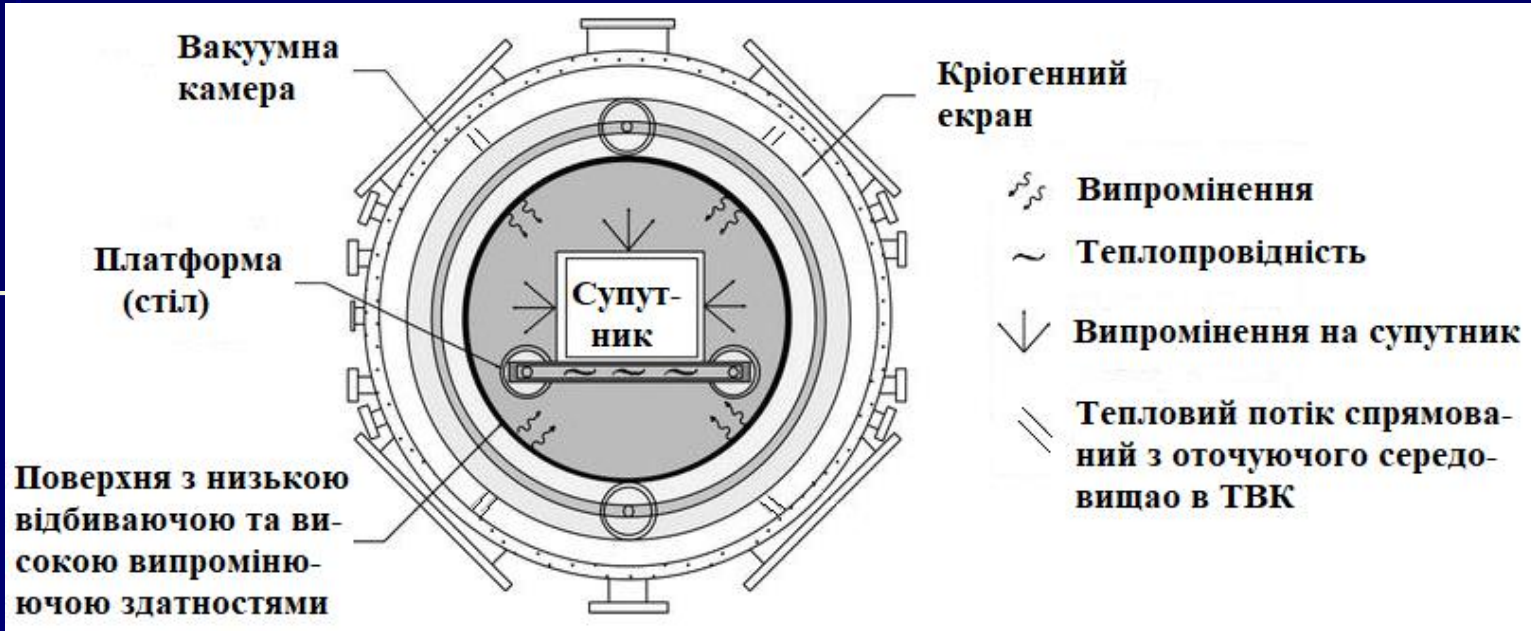
Кубічна



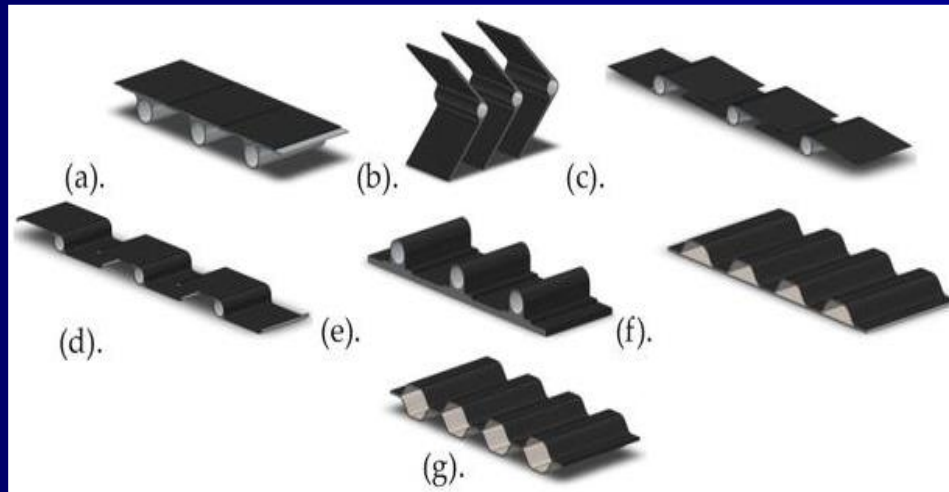
Вертикальна  
циліндрична



Горизонтальна  
циліндрична

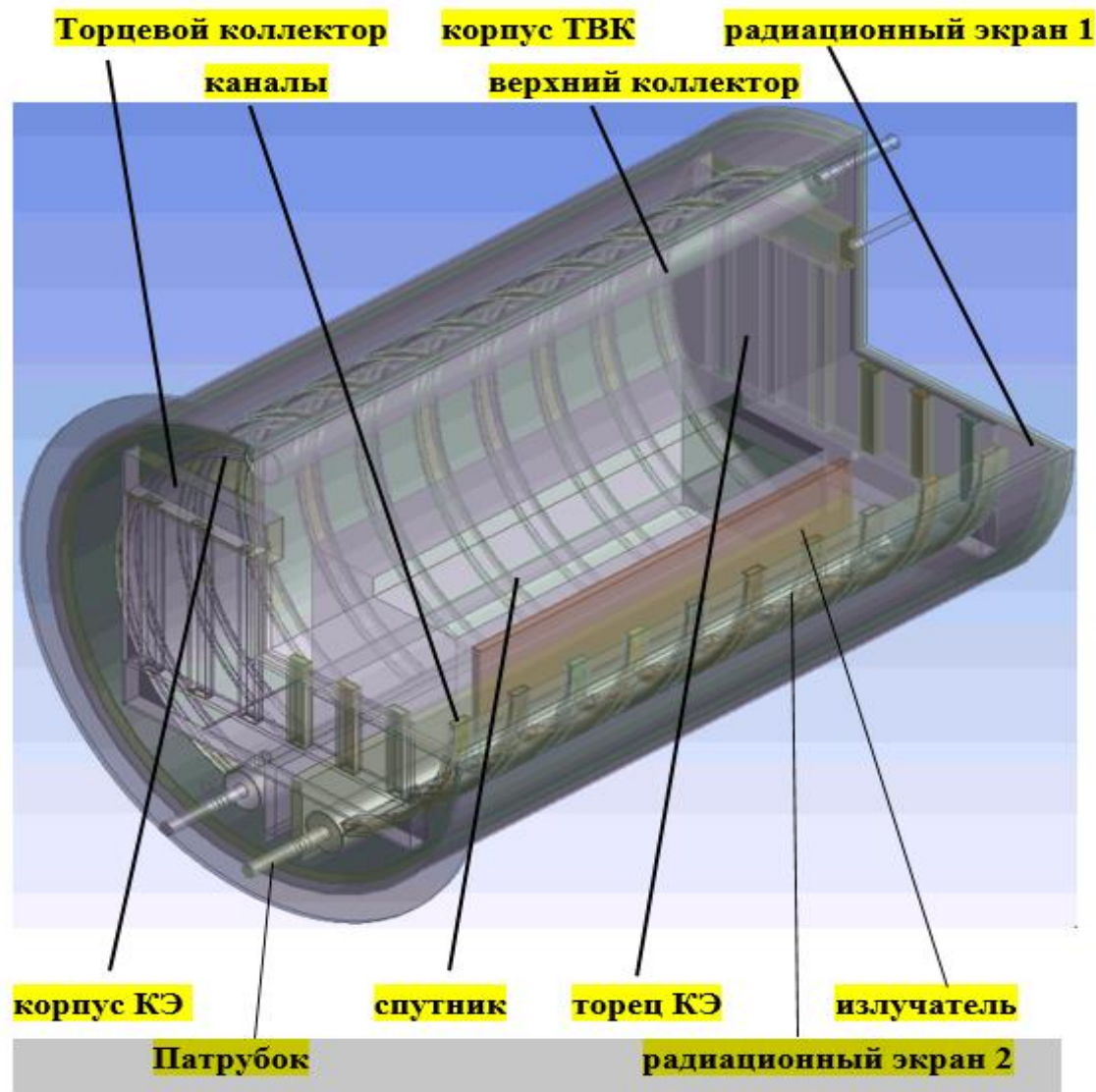


## Типові форми теплообмінних елементів поверхонь КЕ



а) – пласке крило (трубка з плавниками); б) – шеврон; с) – крило кажана; д) – рельєфне крило кажана; е) – D-подібний канал з основою; ф) – одностороннє тиснення; г) – двостороннє тиснення





## Проектні параметри

Сплавы КЕ: Амг-5, АД-31

Сплав теплових мостів та столу: нержавіюча сталь 12Х18Н10Т

Робоча речовина: рідкий азот при температурі 93 К та тиску 4,76 бар

Тип КЕ: випарний

Теплове навантаження на супутник: 3 кВт

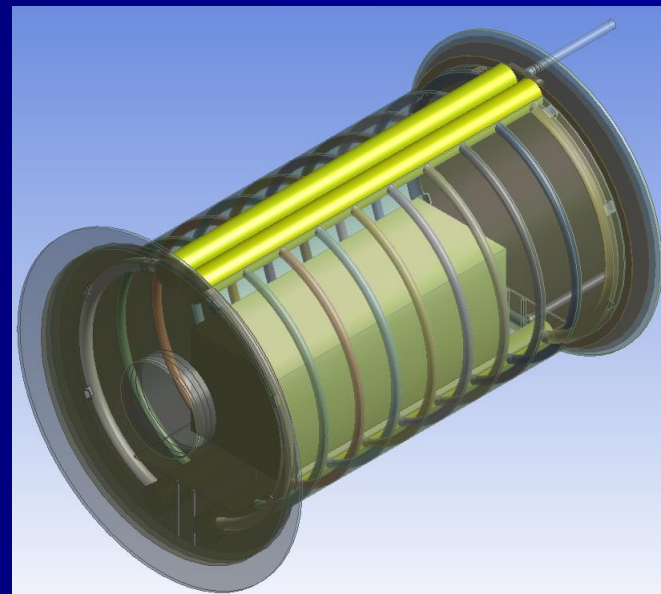
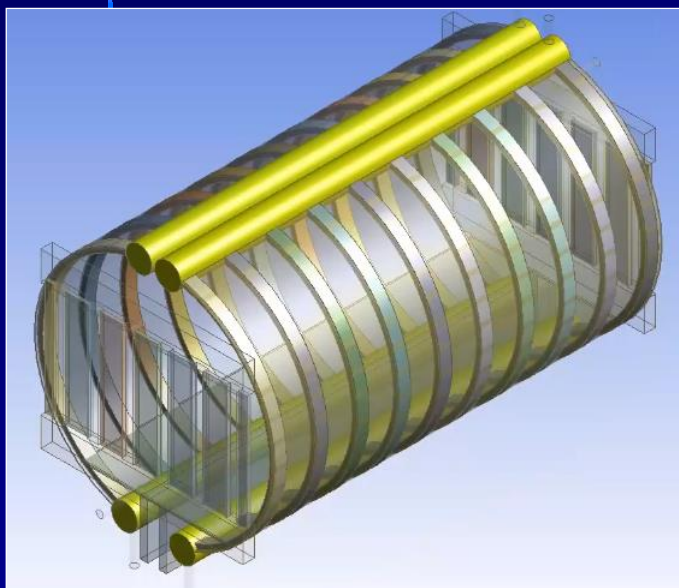
Неізотермічність поверхні теплообмінного елемента КЕ: 15К

Внутрішній об'єм КЕ: 0,7 м<sup>3</sup>

Вага КЕ: 65 кг

## НЕОБХІДНІ РОЗРАХУНКИ:

1. Вибір діаметру і кількості каналів охолодження, а також ширини плавників КЕ з двома верхніми колекторами.
2. Аналіз неізотермічності каналів охолодження з плавниками
3. Аналіз та керування теплогідравлічного стану КЕ, залежність витрати азоту від теплового навантаження



Геометрична модель концепції КЕ з 4-ма колекторами, що складається з 2 торцевих та 2 циліндричних частин на основі прямокутних каналів охолодження з плавниками

Геометрична модель концепції КЕ з 4-ма колекторами що складається з 2 циліндричних частин на основі круглих каналів охолодження з плавниками та неохолоджуваними торцевими екранами

3д Модель флюент має сітку, що складається з 6,2 мільйонів комірок з високою якістю для вирішення. Так як модель симетрична то моделюється тільки її половина, на кордоні якої задані умови симетрії. Товщини каналів, патрубків, радіаційних екранів і контактних термічних опорів реалізовані за допомогою функції shell, в якій задані розміри, товщини і матеріали цих об'єктів з їх теплофізичними властивостями. Для моделювання вакууму всередині ТВК, повітря були присвоєні такі теплофізичні параметри: Щільність -  $1 \cdot 10^{-5}$ ; Теплоємність -  $1 \cdot 10^5$ ; Теплопровідність -  $1 \cdot 10^{-5}$ ; Динамічна в'язкість -  $1 \cdot 10^5$ . Для обліку радіаційного теплообміну в 3д була використана модель дискретних ординат.

Модель у 1д програмному забезпеченні flownex, розроблена за допомогою 575 твердих та рідких вузлів, 1258 компонентів теплового зв'язку, 137 елементів гідравлічного контуру. Для обліку радіаційного теплообміну була використана модель Two-surface enclosure

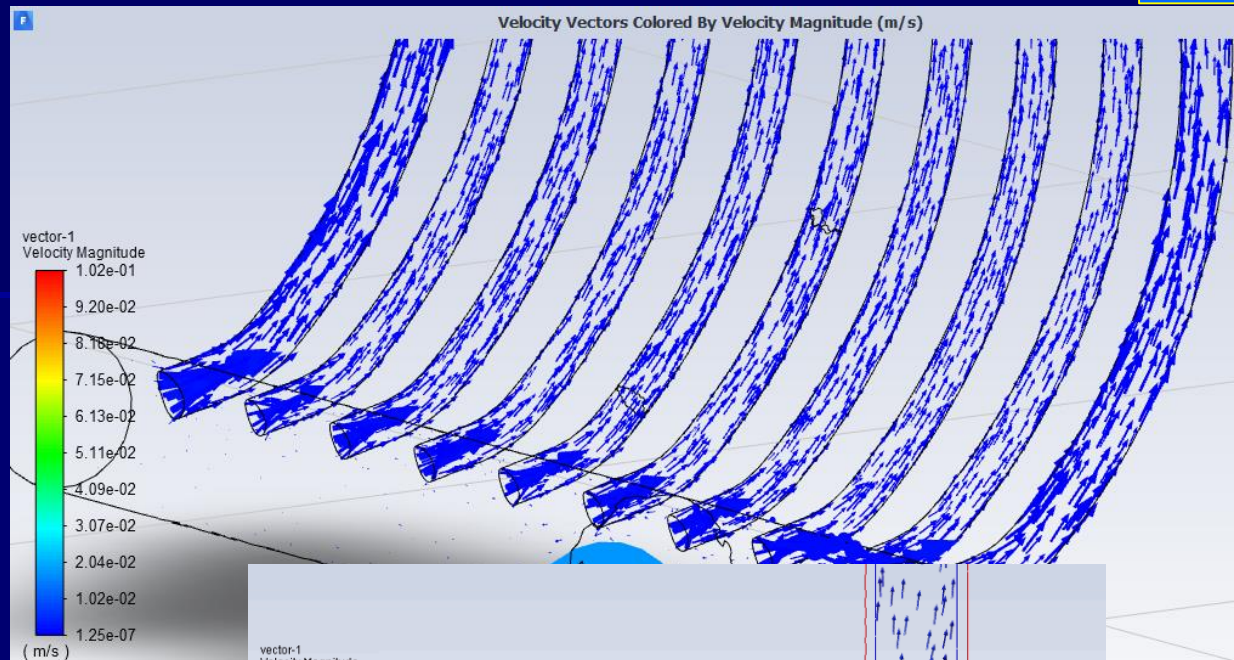
### Порівняння температур поверхонь ТВК у двох програмних забезпеченнях (Ansys Fluent та Flownex)

Параметр	Fluent	Flownex
Температура поверхні ТВК, °C	17,29	17,61
Температура поверхні Кришки КЭ, °C	-189,11	-189,14
Нерівномірність температури по плавнику, °C	11,1	13,2
Температура 1-го циліндричного рад екрану, °C	-77,53	-77,8
Температура 2-го циліндричного рад екрану, °C	-16,11	-15,11
Температура 1-го торцевого рад екрану, °C	-54,43	-55,46
Температура 2-го торцевого рад екрану, °C	-23,16	-23,38
Температура 3-го торцевого рад екрану, °C	-1,54	-0,35

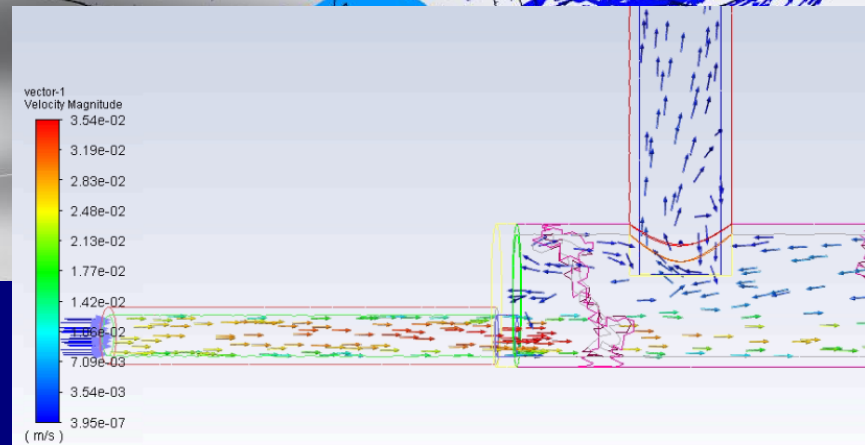
За результатами розрахунку температур ТВК і КЕ можна зробити висновок, що модель верифікована



**Вектори швидкості рідкого азоту в каналах охолодження КЕ**



**Профіль швидкості рідкого азоту у трубці живлення нижнього колектору та першого каналу**



**На основі аналізу результатів гідравлічного розрахунку КЕ можна зробити висновок, що оптимальною конструкцією є КЕ з 4-ма колекторами на основі 13-ти круглих труб з плавниками та неохолоджувальними торцями**

# Порівняння рівномірності витрат при різних діаметрах каналів та кількості колекторів при різних навантаженнях

	Нагрузка	Параметр	4 колектора	3 колектора
Результати моделювання характеристик KE для конструкцій (тип 1) діаметрі каналів з 1 по 12 0,02м та 13 – 0,029м	400 Вт	Загальна витрата, г/с	10,4	10,1
		х на виході із ТВК	0,804	0,785
		Різниця витрат між каналами 1-12, %	25	60
	800 Вт	Загальна витрата, г/с	19,6	26,5
		х на виході із ТВК	0,837	0,59
		Різниця витрат між каналами 1-12, %	28	70
	150 Вт	Загальна витрата, г/с	8,6	8,5
		х на виході із ТВК	0,406	0,384
		Різниця витрат між каналами 1-12, %	24	59
Результати моделювання характеристик KE для конструкцій (тип 2) при діаметрі каналів з 1 по 12 0,018м та 13 – 0,025м	400 Вт	Загальна витрата, г/с	10,2	9,7
		х на виході із ТВК	0,82	0,817
		Різниця витрат між каналами 1-12, %	16	45
	800 Вт	Загальна витрата, г/с	18,2	22
		х на виході із ТВК	0,9	0,71
		Різниця витрат між каналами 1-12, %	17	52
	150 Вт	Загальна витрата, г/с	9	8,2
		х на виході із ТВК	0,38	0,4
		Різниця витрат між каналами 1-12, %	16	45
Результати моделювання характеристик KE для конструкцій (тип 3) при діаметрі каналів з 1 по 12 0,016м та 13 – 0,023м	400 Вт	Загальна витрата, г/с	9,5	9,5
		х на виході із ТВК	0,89	0,89
		Різниця витрат між каналами 1-12, %	10	30
	800 Вт	Загальна витрата, г/с	18	20,5
		х на виході із ТВК	0,91	0,76
		Різниця витрат між каналами 1-12, %	10	38
	150 Вт	Загальна витрата, г/с	8,4	7,7
		х на виході із ТВК	0,41	0,42
		Різниця витрат між каналами 1-12, %	10	32

**Конструкція KE з 4-ма колекторами є найбільш економічною з точки зору витрати рідкого азоту**

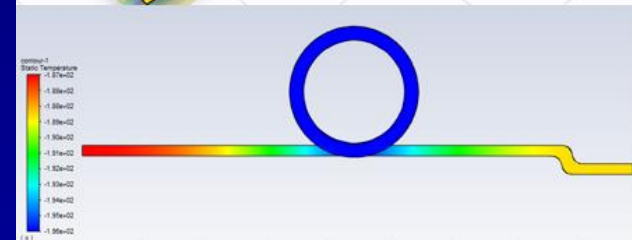
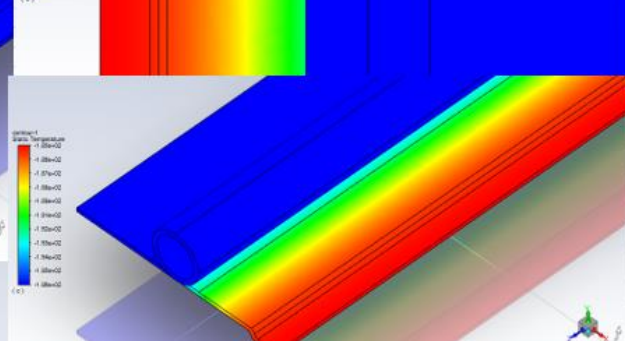
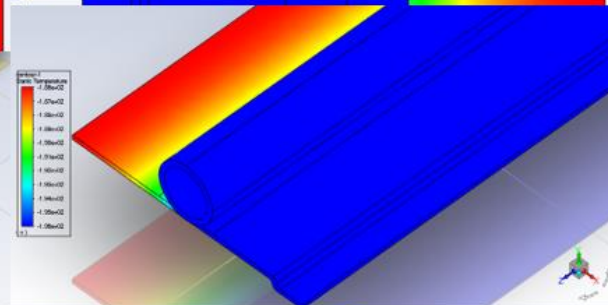
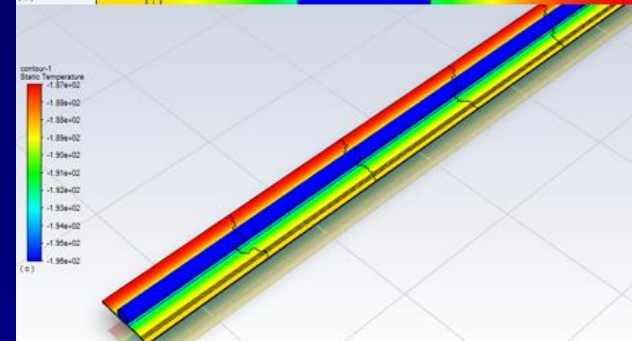
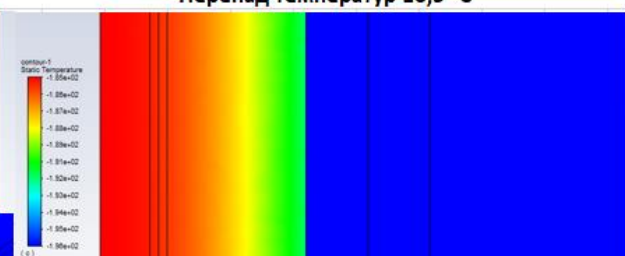
## Неізотермічність окремо обраного каналу з плавником, при різних кутах випромінювання $0^\circ$ (навпроти), $+45^\circ$ , $-45^\circ$

### Неізотермічність

Випромінювач навпроти  
Перепад температури  $9,4^\circ\text{C}$

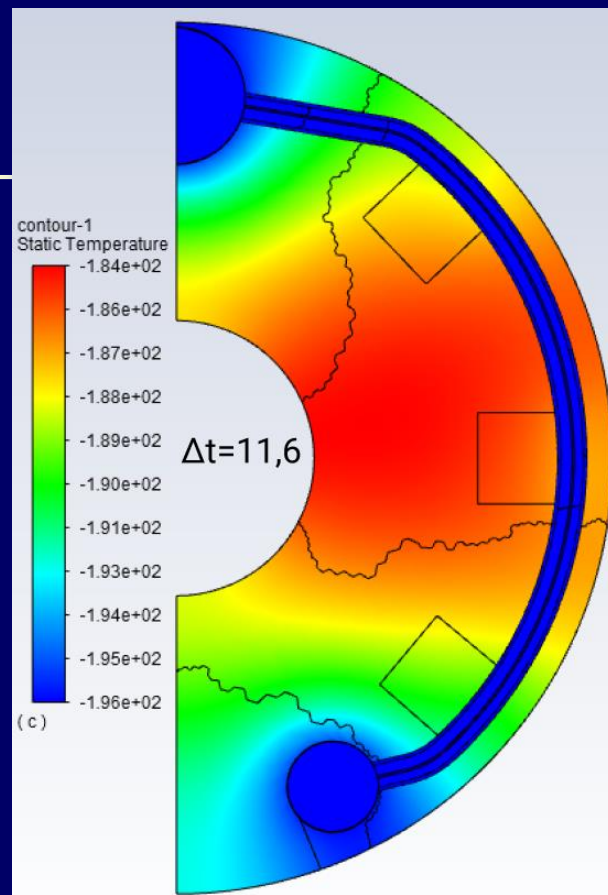
Випромінювач під кутом, зі сторони рівного плавника  
Перепад температур  $10,6^\circ\text{C}$

Випромінювач зі сторони зігнутого плавника  
Перепад температур  $10,9^\circ\text{C}$

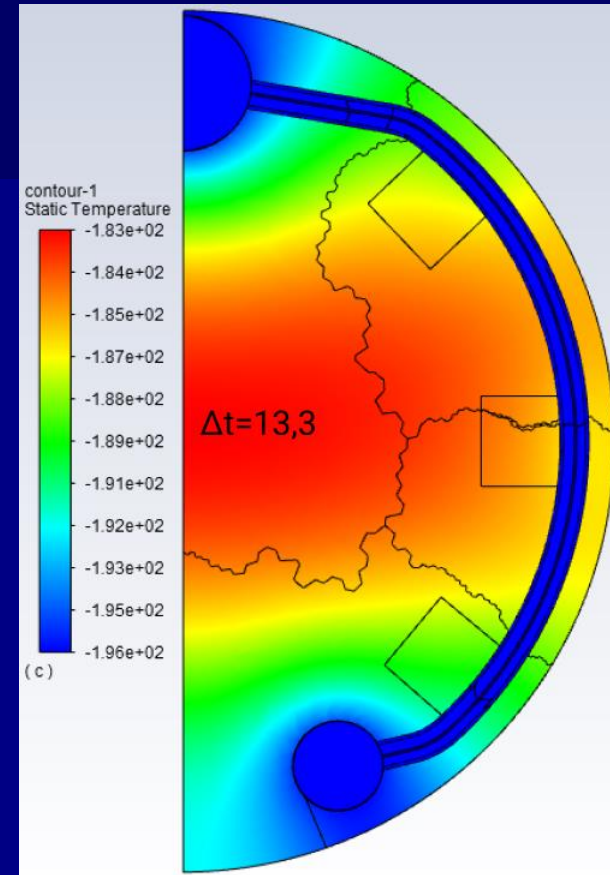


На основі результатів неізотермічності каналу з плавником вибрані наступні геометричні розміри: діаметр і товщина стінки каналу –  $16 \times 2,5$  мм; товщина і ширина плавника –  $2 \times 50$  мм, довжина плавника відповідає довжині каналу, що становить  $1,15$  м

## Неізотермічність дверці КЕ



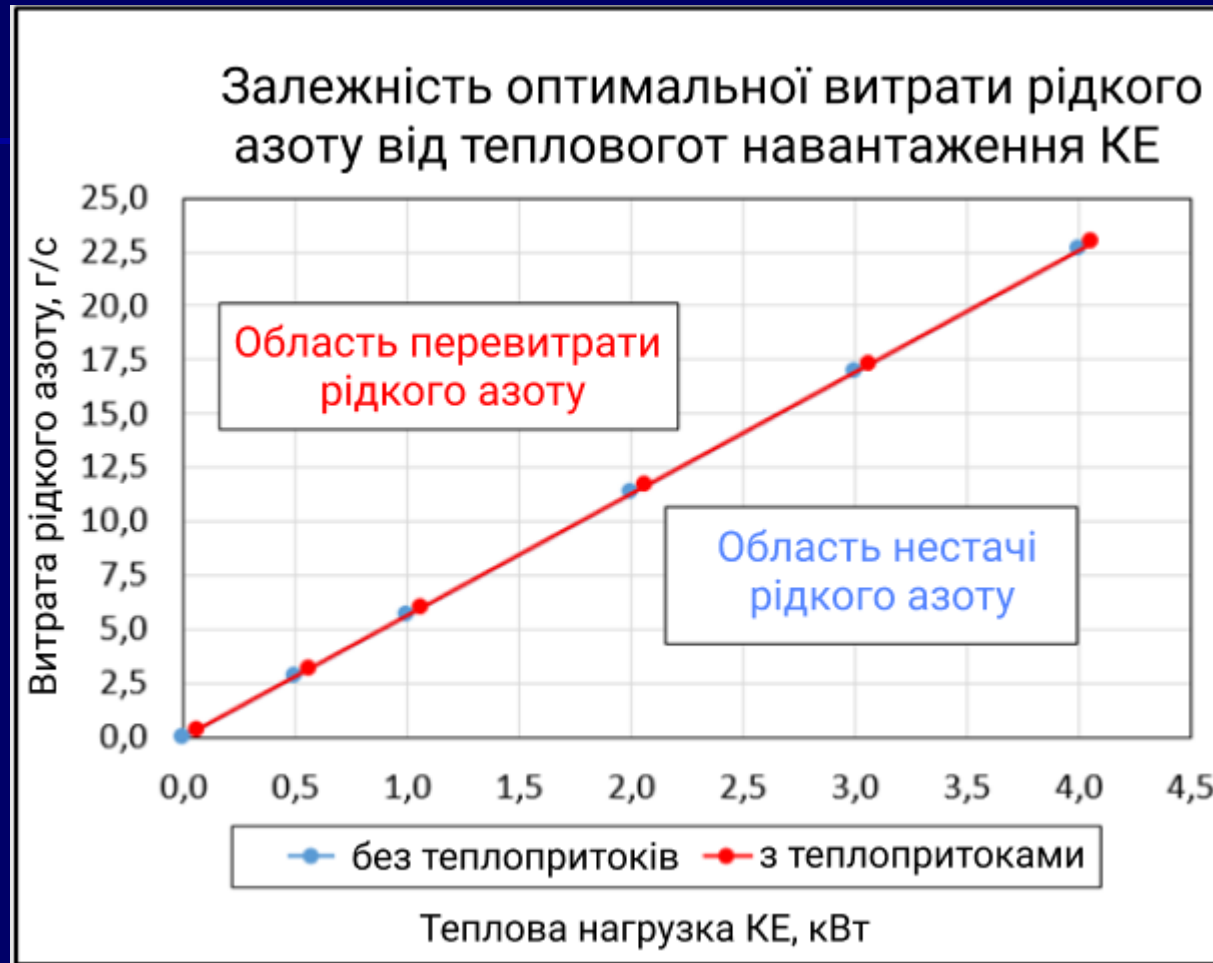
## Неізотермічність глухого торця КЕ



На основі результатів розрахунку неізотермічності торців КЕ вибрані наступні геометричні розміри та матеріал: діаметр і товщина торців –  $980 \times 4$  мм, матеріал АД31. Для зменшення різниці температур необхідно встановлювати на торцях 6 кутиків  $10 \times 10$  мм, що контактують з охолоджувальним і охолоджуванним екранами



## Залежність витрати азоту від теплового навантаження



1. За результатами розрахунків наведених на слайді 9,10 при заданих теплових навантаженнях 150, 400 і 800 Вт оптимальною конструкцією КЕ є конструкція з 4 колекторами і діаметрами з 1 по 12 канали 0,016 м та 13 канал діаметром 0,023м. Для заданої конструкції КЕ характерним є найнижча витрата рідкого азоту (150 Вт – 8,4 г/с, 400 Вт – 9,5 г/с, 800 Вт – 18 г/с), на виході з колекторів КЕ практично пара азоту із незначною частиною рідини (150 Вт – 41%, 400 Вт – 89 %, 800 Вт – 91%) та мінімальна різниця витрат рідкого азоту (із розглянутих типів конструкцій) між каналами з 1 по 12, що становить 10%.
2. За результатами розрахунків на неізотермічність було визначено геометричні та теплофізичні параметри конструкції ТВК та КЕ, за умови підтримання неізотермічності на теплообмінних поверхнях КЕ.
3. На основі усіх проведених розрахунків була розроблена конструкторська документація для виготовлення даного ТВК та КЕ
4. Для керування установкою ТВК з КЕ була розроблена залежність витрати азоту від теплового навантаження

**ДЯКУЮ ЗА УВАГУ**