

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет
Кафедра холодильних установок і кондиціонування повітря



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

На тему: Проект підсистеми комп'ютерного розрахунку поля температур у шафі побутового холодильника NORD-239
(назва кваліфікаційної роботи згідно з наказом ЗВО)

Здобувача Гуцулюк І. Д.
(прізвище, ініціали)
СВО Бакалавр IV курсу ЕН- 141а групи

Керівник проф. Байдак Ю. В.
(посада, прізвище та ініціали)

Консультанти _____
(посада, прізвище та ініціали)

(посада, прізвище та ініціали)

Кваліфікаційна робота допускається до захисту
Рішення кафедри від 31 травня 2024 р., протокол № 12

Завідувач кафедри ХУ і КП
(назва кафедри)

(підпис)

Михайло ХМЕЛЬНЮК
(ім'я прізвище)

Одеса - 2024 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет низькотемпературної техніки та інженерної механіки

Кафедра холодильних установок і кондиціонування повітря

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 142 «Енергетичне машинобудування»

Освітня програма «Холодильні машини, установки і кондиціонування повітря»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри М.Г. Хмельнюк

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Гуцулюк Іван Дмитрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проект підсистеми комп'ютерного розрахунку поля температур у шафі побутового холодильника NORD-239

затверджена наказом ЗВО від 31.08.2023 року № 487-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 30.05.2024 року

3. Вихідні дані роботи Стаціонарний побутовий холодильник морозильник типу КШД-260 з габаритними розмірами 1800x590x600 мм³. Застосований хладон R-134a, R-409a ($t_{\text{кипіння}} = -29^{\circ}\text{C}$). Напруга живлення 220 В, однофазна, частота струму 50 Гц.

Перелік питань, які потрібно розробити 1. Виконати огляд сучасного стану розвитку побутових холодильників типу КШД-260 2. Викласти алгоритм математичної моделі щодо вирішення задачі тепло і масо переносу. 3. Виконати моделювання поля температури повітря в об'ємі шаф холодильника без теплового навантаження. 4. Виконати моделювання поля температури повітря в об'ємі шаф холодильника із тепловим навантаженням.

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

Презентація PowerPoint:

1. Галузь застосування, об'єкт і предмет досліджень та мета роботи (1 аркуш).

2. Вирішені у роботі питання (1 аркуш).

3. Предмет та об'єкт досліджень та його вихідні дані (1 аркуш).

4. Принципова схема та цикл компресійної холодильної машини (1 аркуш).

5. Математична модель задачі конвекції та кондукції (1 аркуш).

6. Алгоритм чисельного моделювання задачі у програмному середовищі COMSOL і чисельного моделювання. Вихідні дані. (2 аркуші).

7. Результати чисельного моделювання поля температур у холодильній шафі та морозильній камері для випадку холостого ходу і при завантаженні об'єктами охолодження (5 аркушів).

8. Висновки та пропозиції (1 аркуш).

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Розділи 1, 2, 3. 4,5	Проф. Байдак Ю.В.	1.09.23р	30.05.24р
Нормоконтроль			

7. Дата видачі завдання 31.08.2023 року

Керівник _____

Завдання прийняв до виконання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд сучасного стану розвитку побутових холодильників	1.01.24р - 14.01.24р	виконано
2.	Теплова модель розрахунку поля температур в об'ємі холодильника морозильника типу КШД-260	15.01.24р - 7.03.24р	виконано
3.	Моделювання задачі тепло і масообміну на ПЕОМ	8.03.24р - 7.04.24р	виконано
4.	Чисельне моделювання поля температури ненавантаженого побутового холодильника	8.04.24р - 7.05.24р	виконано
5.	Чисельне моделювання поля температури навантаженого побутового холодильника	8.05.24р - 18.05.24р	виконано
6.	Охорона праці і техніка безпеки	18.05.24- 24.05.24р.	виконано
7.	Оформлення роботи і презентації PowerPoint	18.05.24-30.05.24р	виконано

Здобувач - дипломник _____

Керівник роботи _____

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник

Гуцулюк Іван Дмитрович _____

РЕФЕРАТ

Враховуючи курс України на подальше удосконалення енергетичної ефективності холодильної техніки, впровадження математичної моделі підсистеми комп'ютерного розрахунку задачі тепло масо пересування повітря в середині об'ємів шаф охолодження і морозильних камер промислових холодильників, дозволяє суттєво вплинути на точність отриманих результатів під час їх проектування і здатне забезпечити можливість чисельного вивчення роботи холодильників, чим скоротити час щодо прийняття рішення стосовно керування його продуктивністю упродовж застосування за місцем призначення, а отже є **актуальним питанням**.

Галузь застосування - побутові холодильні установки і системи кондиціонування повітря.

Об'єкт дослідження - холодильна шафа і морозильна камера стаціонарного холодильника морозильника.

Предмет дослідження - побутовий холодильник морозильник типу КШД-260.

Мета роботи - для існуючої топології побутових холодильників типу КШД виконати моделювання поля температур за методом кінцевих елементів шляхом вирішення рівняння Лапласа, яке закладено у програмному середовищі COMSOL Multiphysics в розділі Convection and Conduction, здійснити розрахунки поля температур повітря у стаціонарному режимі як на ділянці випарника так і в корисному об'ємі холодильної шафи.

Розрахунки поля температур виконані для двох випадків - без завантаження і при завантаженні шаф холодильника. За даними розрахунків поля температур встановлено ділянки в об'ємі шаф на яких рух повітря уповільнений і тому вони вимагають штучного утворення каналів сполучення з охолоджуючим випарником - улаштуванням системи no frost.

Матеріали досліджень є корисними у навчальному процесі при підготовці фахівців відповідного профілю.

Звіт про ДР: 77 стор., 2 табл., 36 рис., 10 джерел

ABSTRACT

Taking into consideration the course of Ukraine on further improvement of refrigeration equipment energy efficiency, the implementation of mathematical model of computer calculation subsystem of heat, mass, air movement problem in the middle of industrial refrigerators cooling cabinets and freezers volumes, allows to influence significantly on the accuracy of the results obtained during their design and is able to provide the possibility of numerical study of refrigerators operation, to reduce the time for making decision regarding the management of its application at the place of destination, and therefore is a relevant issue.

Application field - household refrigeration units and air conditioning systems.

The object of investigation is the refrigeration cabinet and freezer compartment of a stationary refrigerator-freezer.

The subject of investigation is a consumer refrigerator-freezer type KShD-260.

The purpose of the work - to perform simulation of the temperature field using the finite element method by solving the Laplace equation, which is embedded in the COMSOL Multiphysics software environment in the Convection and Conduction section, to perform calculations of the air temperature field in the stationary mode both in the evaporator area and in the usable volume of the refrigerator for the existing topology of household refrigerators of the KShD type.

Calculations of the temperature field were made for two cases - without loading and with loading of refrigerator cabinets. According to the calculations of the temperature field, the areas in the volume of the cabinets where the air movement is slowed down were specified and that's why they require the artificial formation of communication channels with the cooling evaporator - by the installation of the no frost system.

Research materials are useful in the educational process when training specialists of the relevant profile.

Report about the graduate work: 77 pages, 2 tables, 36 figures, 10 ref.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТЕМИ.....	7
1. СУЧАСНИЙ РІВЕНЬ РОЗРОБОК І ВИРОБНИЦТВА ПОБУТОВИХ КОМПРЕСІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ ПРИЛАДІВ.....	9
1.1. Аналіз сучасного стану вітчизняного та світового виробництва і розвитку параметричного ряду компресійних холодильних приладів.....	11
1.2. Напрямки розвитку параметричного ряду компресійних холодильних приладів.....	15
Постановка задачі.....	16
2. ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ ХОЛОДИЛЬНИКА МОРОЗИЛЬНИКА.....	19
2.1. Принципова схема та цикл компресійної холодильної машини.....	19
2.2. Моделювання задачі розподілу поля температур у повітрі шаф холодильника.....	23
2.2.1. Постановка задачі моделювання.....	25
3. ЗАСТОСУВАННЯ ПЕОМ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ТЕПЛОМАСООБМІНУ.....	30
3.1. Робота в COMSOL Multiphysics.....	32
3.1.1. Навігатор моделей і головне меню.....	32
3.1.2. Головне меню.....	33
3.1.3. Робоча область і завдання геометрії.....	34
3.1.4. Завдання фізичних властивостей об'єктів і початкових умов.....	35
3.1.5. Завдання межових умов і зміна диференціальних рівнянь.....	36
3.1.6. Побудова сітки.....	37
3.1.7. Обрання вирішуючого пристрою.....	38
3.1.8. Візуалізація результатів розрахунку.....	38
4. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР У ШАФАХ ХОЛОДИЛЬНИКА.....	40
4.1. 2D моделювання побутового холодильника у режимі холостого ходу - без об'єктів охолодження.....	41

4.2. 2D моделювання побутового холодильника з об'єктами охолодження.....	51
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	63
5.1. Класифікація приміщення по ступеню небезпеки враження електричним струмом.....	63
5.2. Розрахунок заземлення із застосуванням програмного середовища.....	64
Висновки до розділу 5.....	68
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	69
ЛІТЕРАТУРА.....	70
ДОДАТОК Файли презентації.....	72

ВСТУП

Щорічне виробництво харчових продуктів в світі сягає 4 мільярдів тон, з яких майже половина має малий термін зберігання, а відтак залежить від засобів і умов їх зберігання у побуту споживачів. Об'єми харчових продуктів, які належать охолодженню, визначаються попитом споживчого ринку. Швидкопсувні продукти потрапляють до місця утримання через закупівлю у торгівельній мережі магазинів, ринків тощо. Оскільки збереження харчових продуктів здійснюється в умовах можливих коливань температури оточуючого середовища в приміщенні від +18 до + 42°C, суттєвого значення отримують технічні засоби які забезпечують їх зберігання.

Збільшення у торгівельній мережі продажу імпортованих охолоджених продуктів, при зниженні конкуренції з боку вітчизняних виробників упродовж останніх років, в більшій мірі обумовлено зовнішнім їх дизайном та деякими наведеними продуктовими якостями рекламного характеру і під час необґрунтованими.

Сьогодні, як в Україні так і країнах постачальників холодильної техніки, відсутній вагомий критерій оцінки якості цієї техніки, а саме – холодильний коефіцієнт. Таке становище обумовлене причинами різного характеру. Перша причина пов'язана із відсутністю у їх виробників бажання інформувати споживачів їх продукції про реальний стан ефективності роботи їх побутових холодильників та відсутністю контролю державних інституцій за споживаною ними енергією. Інша причина – відсутність методики та заходів з контролю, діагностики, які би дозволили оперативно встановлювати ефективність побутової техніки за показниками кількості тепла вилученого з камер охолодження або морозильних по відношенню до потужності спожитої

					КРБ.ХУКП.1.487-03.1.12			
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Гуцулюк І.Д.			Проект підсистеми комп'ютерного розрахунку поля температур у шафі побутового холодильника NORD-239	Лит.	Лист	Листів
Перевір.		Байдак Ю.В.					4	88
Реценз.						ОНТУ гр. ЕН-141		
Контр.								
Затверд.								

електричним приводом компресора за визначений термін часу.

Широке різноманіття тепломеханічних систем, що використовуються у сучасних холодильниках, їх енергетичні та економічні показники залишаються майже незмінними упродовж багатьох років, а саме: необґрунтовано великий приплив тепла із зовні через недосконалу теплоізоляцію на одиницю корисного об'єму; великі витрати енергії на одиницю охолоджуваного продукту внаслідок невеликих та неефективних охолоджуючих поверхонь обладнання; незадовільні на сучасному рівні енергетичні показники герметичних мотор компресорних агрегатів; великі витрати корисної потужності у компресорі при найбільшому значенні відношення тиску на його вході та виході, тощо.

Тенденція, яка склалась за останнє десятиріччя у поновленні типів побутових холодильників вказує, що найбільшим попитом користуються їх зразки великої ємності та з низькотемпературним відділенням. У такому холодильнику повинна підтримуватися температура в холодильній камері не вище 5°C, а в морозильній не вище мінус 18°C при температурі оточуючого середовища 32°C і, бажано, з найменшим споживаним електричної енергії.

Під час роботи холодильного приладу відбувається природне зношування поршневої системи компресора, старіння рухливих елементів - клапанів й, в наслідок, зниження його холодильної продуктивності. Одночасно із цим, система холодильної приладу може мати незначні дефекти герметичності, через які з неї випливає хладон. Можливі причини погіршення холодильної продуктивності суттєво знижують ефективність холодильного апарата і значно впливають на кінцеву вартість об'єктів охолодженого зберігання. У першу чергу це перевитрата енергоресурсів, а також зниження якості об'єктів зберігання в морозильній і холодильній камері й збільшення часу виходу холодильного апарата в сталий режим, що встановився за необхідним значенням температури.

									Лист
									5
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

Актуальність. Покращення ефективності побутових холодильників є пріоритетним напрямком діяльності у галузі харчової промисловості, оскільки саме вони відносяться до категорії обладнання, яке зберігає стратегічні товари і сприяє забезпеченню сталого розвитку всієї економіки у державі.

Саме таке комплексне вирішення задачі удосконалення проектних методик щодо покращення побутової техніки відповідає Постанові Верховної Ради України від 22.02.20001 р. №2274-111 (2274-14) «Енергетична стратегія України на період до 2030 року», Постанові Кабінету Міністрів України від 03.04.2006 р. №412 «Про забезпечення ефективного використання енергетичних ресурсів», Постанові Кабінету Міністрів України №787 від 3 вересня 2008 року «Про затвердження Технічного регламенту максимально дозведеного споживання електроенергії холодильними приладами», Постанові Кабінету Міністрів України від 22.10.2008 р. №935 «Про організацію державного контролю за ефективним (раціональним) використанням паливно-енергетичних ресурсів» і є важливою господарською задачею, тим більше, що в Україні (м. Одеса) знаходиться найпотужніший морський причал з контейнерних їх перевезень.

Таким чином об'єктом дослідження в роботі є розробка математичної моделі теплових процесів (задача тепло і масо обміну Лапласа), а саме з розрахунок найбільш впливового показника - поля температур в об'ємі шаф побутового холодильника, яке постає основою для вирішення задачі гідро та газодинаміки Нав'є-Стокса на рівні повного проектування холодильників.

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
						6
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТЕМИ

За статистикою відомо, що закупівлю продуктів харчування пересічний мешканець здійснює 2 рази на місяць. Це узгоджується з середнім об'ємом двокамерного холодильника при температурі в морозильній шафі не мінус 18⁰С. Використання такого холодильника забезпечує збереження якості продуктів харчування в холодильній шафі ще упродовж 3 -7 діб і 2 - 3 тижня в низькотемпературній шафі.

За обліком норм рекомендованих інститутом громадського харчування, споживання продуктів, які підлягають зберіганню в холодильнику із розрахунку на одну людину, а також норми завантаження його продуктами, попередня економічна ефективність режиму заморожування холодильника об'ємом 260 дм³ прийме вид:

- У морозильній камері холодильника передбачається зберігання 12 - 15 кг заморожених продуктів.
- Добовий раціон продуктів для однієї родини, що складається в середньому з 4 осіб, становить $0,525 \text{ кг} * 4 = 2,5 \text{ кг}$.
- Якщо максимальна ємність морозильної камери 15 кг, те середня родина витратить продукти, що зберігаються в неї протягом 6 діб.
- Таким чином, періодичність закупівель протягом місяця складе 5 разів, а протягом року 60 разів. Враховуючи середню витрату часу на одну закупівлю - 2 години, одержуємо річну витрату часу 120 годин.
- При незначній тривалості зберігання та середній періодичності закупівель 1 раз за 2 доби, тобто 15 разів на місяць, річна витрата часу складе 360 годин ($15 * 12 * 2$).
- На підставі отриманих даних економія часу за рік у споживача, за рахунок скорочення числа закупівель, складе 240 годин.

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		7

• Якщо середня вартість однієї години вільного часу становить (12000гр./24дні/8годин) приблизно 60 гривень, то економія у споживача, за рахунок скорочення витрат часу, складе $60 \cdot 240 = 14400$ гривень.

• Якщо орієнтовно прийняти річний випуск холодильників об'ємом 260 дм³ у кількості $V=100$ тисяч штук, то передбачуваний народногосподарський ефект складатиме

$$\mathcal{E}_{н/х} = 14400 \cdot 100 = 1440000 \text{ тыс. гр.}$$

• Припускаючи, що енергоефективність компресора нижче на 15% від задекларованої і під час експлуатації холодильника енергоспоживання складає 1,5 кВт/добу, тобто є вищим на 0,225 кВт/добу, одержимо перевитрату електроенергії за рік в обсязі

$$\Delta W = 0,225 \cdot 2,65 \cdot 365 = 217,63 \text{ грн.}$$

• З розрахунку на загальний обсяг випуску холодильників 260 дм³, кошти, витрачені на покриття збитку від зниження якості всієї партії холодильних машин, складуть

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W \cdot V = 217,63 \cdot 100000 = 21,763 \text{ млн. грн.}$$

• Таким чином, розробка заходів щодо удосконалення роботи холодильників, методик їх проектування заснованих на сучасних програмних продуктах, розробка обладнання контролю холодильного коефіцієнта з метою виявлення холодильних апаратів що мають ефективність нижчу нормованої за класом якості для зберігання продукції, складе 21,763 мільйона гривень на рік в одному районному центрі міського типу з населенням у 100000 осіб.

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		8

1. СУЧАСНИЙ РІВЕНЬ РОЗРОБОК І ВИРОБНИЦТВА ПОБУТОВИХ КОМПРЕСІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ ПРИЛАДІВ.

Побутовим компресійним холодильним приладом (КХП) будемо вважати пристрій, призначений для розміщення в ньому і тимчасовому або тривалому утриманні різноманітних об'єктів, температура зберігання властивості яких повинна бути нижче температури оточуючого середовища, а саме: від $-24 \dots -18$ °С до 12 °С. На рис. 1.1 наведено загальний вигляд КХП вітчизняного виробництва моделі КШ із корисним об'ємом шаф до 220 дм³ і сумісним розташуванням шафи охолодження (ШО) та морозильного відділення, а також моделі КШД із корисним об'ємом шаф більше 260 дм³ і роздільним розташуванням ШО та шафи морозильної (ШМ). До складу КХП, окрім ізольованих за теплом ШО, морозильного відділення або ШМ, входить компресійна холодильна машина (ХМ),

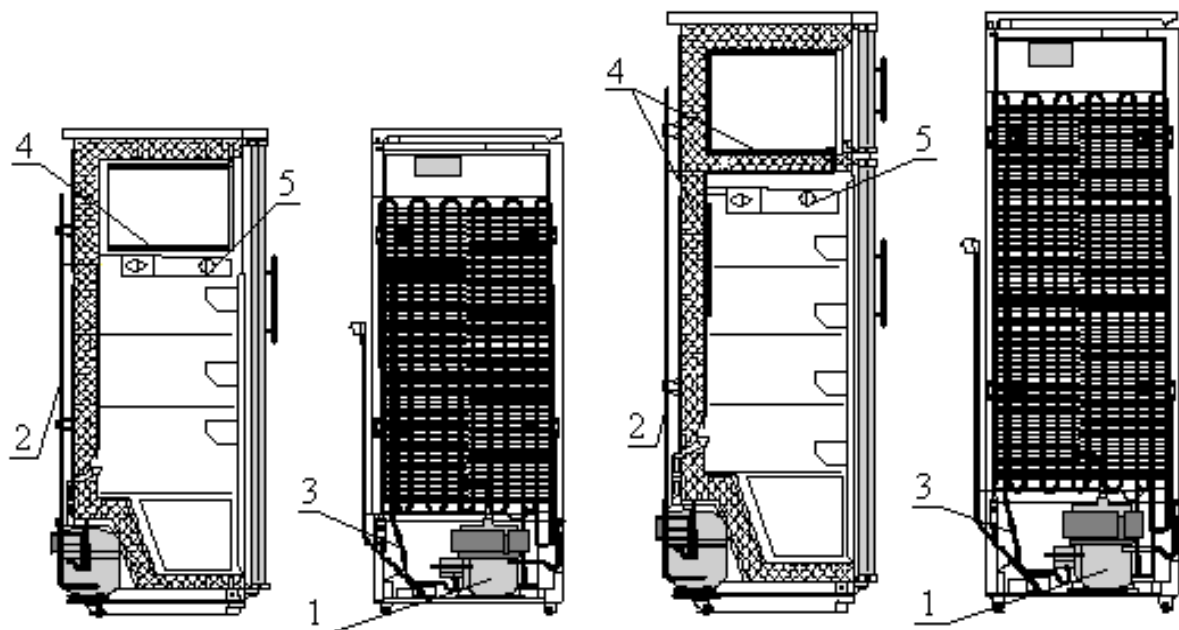


Рис.1.1. Загальний вигляд холодильника морозильника вітчизняного виробництва моделі КШ-140...КШ-220 (ліворуч) та КШД-260 (праворуч): 1 – холодильний агрегат до складу якого входять поршневий компресор із приводом від однофазного асинхронного електричного двигуна; 2 – теплообмінний конденсатор; 3 – дросель – капілярна трубка; 4 – випарник; 5 – паровий терморегулятор.

виконана автономною, некерованою, двохпозиційною, тепломеханічною системою, призначеною для роботи в упорядкованому, повторному коротко- часовому режимі. В свою чергу тепломеханічну систему складено із: вбудованого у герметичну оболонку поршневого компресора з механічним приводом від одне - двофазного асинхронного електричного двигуна (мотор компресорний агрегат); теплообмінного конденсатора; дроселя – капілярної трубки із ділянкою теплообміну; одного або декількох випарників, парових терморегуляторів, які автоматично вмикають та вимикають електричний двигун привода компресора чим забезпечується підтримання в ШО холодильника необхідної за режимом охолодження температури. Повторний коротко - часовий режим роботи компресора (двохступеневий), залежно від теплоємності холодильних шаф, відповідає економному споживанню електричної енергії КХП, оскільки охолодження шаф в упорядкованому режимі роботи ХМ продовжується і під час вимкнення компресора внаслідок виштовхування хладону у випарник від надлишкового тиску у конденсаторі, який утворений компресором під час робочого циклу.

У якості робочого тіла КХП застосовують хладон – штучну хімічну речовину (суміш хлору, фтору, водню), яка безпосередньо або за непрямыми ознаками є екологічно шкідливою для оточуючого середовища, має ненульове значення потенціалу руйнуючого озон і потенціалу „ парникового ” ефекту.

Одночасно побутовим КХП притаманні наступні позитивні якості:

- параметричний ряд КХП із корисним об’ємом до 450 дм³ найпростіший у виготовленні, а їх ХМ мають найнижчий рівень енергоспоживання у порівнянні із альтернативними холодильними приладами, працюючими за іншим принципом реалізації процесу теплообміну;

- герметична система ХМ робить її високо надійним приладом, розрахованим на тривалу роботу до стану повної відмови, простою у використанні, що надає можливість масовому її застосуванню у побутових

					ДП ЕН-141а 1.12ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум. Н.	Підпис	Дата		10

холодильниках і навіть при низько розвиненому їх сервісному обслуговуванні;

- однакова топологія КХП у будь-якого його виробника і модульна компоновка (Дж/дм³) дозволяють оперативно, із урахуванням споживчого ринкового попиту змінювати не тільки корисний об'єм ШМ та ШО, а і кількість компресорів, випарників, терморегуляторів тощо, які входять до складу однієї ХМ але за умови отримання якісних техніко-економічних показників приладу в цілому;

- не токсичність хладону по відношенню до людини, у разі його витікання назовні при розгерметизації ХМ, можливість її роботи в межах коливань напруги мережі живлення від 170 до 250 В тощо, роблять КХП безальтернативним охолоджувачем.

1.1. Аналіз сучасного стану вітчизняного та світового виробництва і розвитку параметричного ряду компресійних холодильних приладів

Понад 80% загального об'єму холодильників, які потрапляють на терени України, належать зарубіжним виробникам, а саме: „Samsung” - 12,07%, „Stinol”, „Indesit”, „Ariston” - 9,66%, „Веко” - 3,02% і „Ardo” - 2,73% тощо. Модельний ряд КХП налічує понад 30 їх найменувань і 45 модифікацій із корисним об'ємом 100...350 дм³, у тому числі з об'ємом морозильного відділення 20...125 дм³. Майже усі сучасні холодильники переведені на екологічно безпечні хладони R134a і R600a (ізобутан) і пінополіуретанову теплоізоляцію – циклопентан. За визнанням фахівців застосування у якості хладону - ізобутану R600a дозволило на 20...30% скоротити енергоспоживання і рівень шуму холодильних апаратів. Розробка компресорів нової конструкції із синхронним електричним двигуном з частотним регулюванням обертів ротора надала можливість підвищити його стійкість і надійність у роботі при випадкових коливаннях напруги у мережі живлення. Сучасні КХП оснащують вбудованим вентилятором для

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		11

національного об'єму виробництва КХП з яких 70 % йде на експорт. Італійські фірми, які раніше виробляли дешеву продукцію, останнім часом орієнтовані на більш складну і недешеву техніку. Обумовлено це загостренням конкуренції на ринку збуту виробів і зсуву попиту споживачів в бік їх високого класу комфортності. Японія у більшості випадків виробляє КХП корисним об'ємом більше 300 дм³, двох - і багатокамерні, та такі які дозволяють одночасно відтворювати оптимальні температурні режими для тимчасового і тривалого утримання об'єктів охолодження. Більшість цих моделей оснащено сучасними електронними і мікропроцесорними системами керування режимами роботи КХП, які наближують їх до рівня самих енергозберігаючих у світі. Саме така продукція при умові збалансування їх якості і вартості на користь споживача, найближчим часом займе провідне місце на ринку попиту побутових холодильних приладів. На рис.1.2 та рис.1.3 наведено зовнішній вигляд таких двохкамерних холодильників як Snaige та Libher, який свідчить про їх однакову топологію



Рис.1.2. Загальний вигляд холодильника морозильника
Snaige RF31SM-S0002E

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

низькотемпературним відділенням у 100...120 дм³. Потребам українців із середнім прожитковим рівнем задовольняють такі холодильники як: „Asko”, „Beke”, „Ariston”, „Elin”, „Calex”, „Ardo”, „Bauknecht”, „Candy”, „General Frost” (торгівельна марка родини холодильників і морозильників спільної фірми „Samsung-Calex”), „Sangiorgio”, „Gorenje”, „Samet”, „Ocean”, „Indesit”, „Liebherr”, „Whirlpool” і аналогічні до них за споживчими показниками — „Бирюса”, „Атлант-Минск”, „Stinol” і український „Nord” та " Snaige ".

Висока інтенсивність теплообміну, відсутність сальників і клапанів із розподільним валом у компресорі, простота у виготовленні і обслуговуванні, низька собівартість, розвинений асортимент та сервісне обслуговування КХП здобули їм широке визнання і попит на ринку побутових приладів. Серед сучасних побутових холодильних приладів майже 90 % - компресійного типу, а інші – абсорбційні.

1.2. Напрямки розвитку параметричного ряду компресійних холодильних приладів

Аналіз топології КХП із урахуванням призначення і функціонування його компонентів дозволяє узагальнити головні напрямки сучасного розвитку їх параметричного ряду та найбільш суттєві сучасні розробки, досягнення щодо покращення енергетичної ефективності і продуктивності ХМ, та такі за якими вони будуть розвиватися надалі, а саме:

- удосконалення КХП застосуванням екологічно безпечного хладону;
- збільшення об'єму морозильної камери і зниження в неї температури до рівнів -18...-24 °С;
- впровадження новітніх теплоізоляційних матеріалів, які сприятимуть підвищенню терміну тривалого збереження низької температури у шафах при тимчасовому вимкненні напруги живлення ХМ;
- зниження площі зовнішньої поверхні КХП в межах незмінного корисного об'єму шаф;

										Лист
										15
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

- створення умов із рівномірного розподілу температури всередині корисного об'єму КХП;
- зниження рівня споживання електричної енергії двигуном приводу компресора та пристроїв підвищення комфортності ХМ;
- удосконалення засобів моніторингу, діагностики ХМ, КХП під час розробки нових модельних зразків і їх атестації у виробництві та у споживача.

Постановка задачі

Для прикладу стаціонарного холодильника морозильника КШД-260, рис.1.4, з вихідними даними:

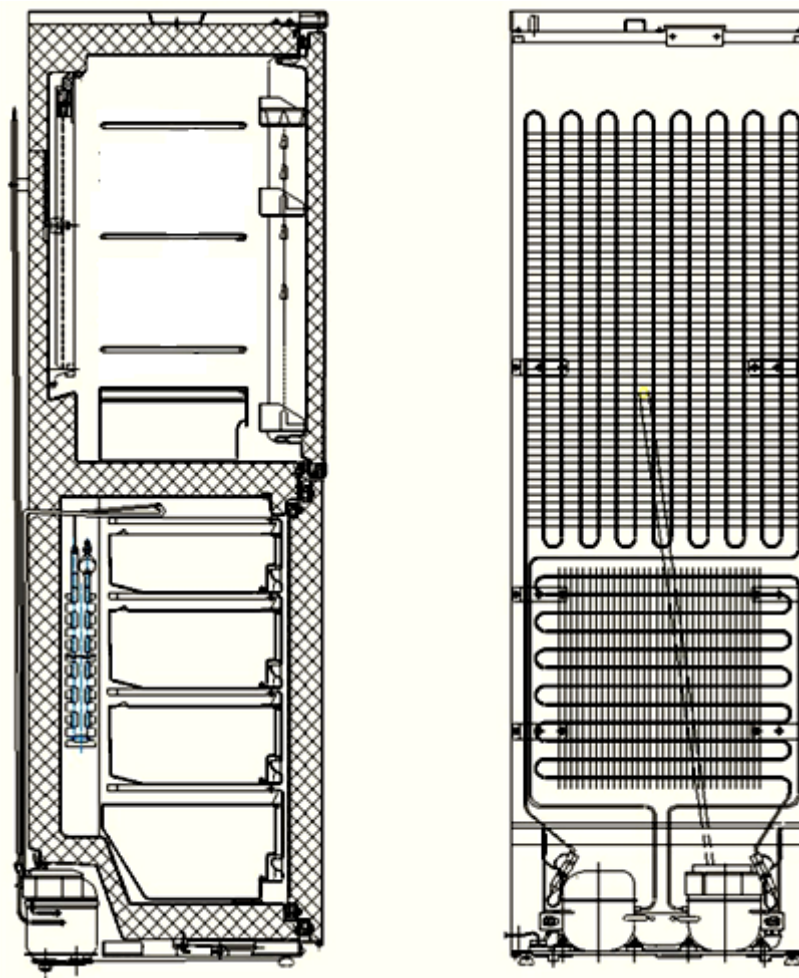


Рис.1.4. Загальний вигляд розрахункової моделі холодильника морозильника вітчизняного виробництва КШД-260

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

Габаритні розміри:	
Товщина прошарку ізоляції стінки холодильної шафи	$\delta_{ХК} = 45 \text{ мм}$
Товщина прошарку ізоляції стінки морозильної шафи	$\delta_{МК} = 68 \text{ мм}$
Довжина шаф холодильника	$a = 590 \text{ мм}$
Довжина холодильної шафи	$a_{ХК} = a - 2\delta_{ХК} = 590 - 2 \times 45 = 500 \text{ мм}$
Довжина морозильної шафи	$a_{МК} = a - 2\delta_{МК} = 590 - 2 \times 68 = 454 \text{ мм}$
Ширина холодильника	$b = 600 \text{ мм}$
Глибина холодильної шафи	$b_{ХК} = 510 \text{ мм}$
Товщина дверці морозильної шафи	$b_{ДВ} = 50 \text{ мм}$
Ширина морозильної шафи	$b_{МК} = b - \delta_{МК} - b_{ДВ} = 600 - 68 - 50 = 482 \text{ мм}$
Висота холодильної шафи	$h_{ХК} = (230 \cdot 10^6) / (500 \times 510) = 902 \text{ мм}$
Висота морозильної шафи	$h_{МК} = (120 \cdot 10^6 + 36,9 \cdot 10^6) / (454 + 482) = 717 \text{ мм}$
Об'єм компресорного відділення	$V_{КОМП} = 250 \times 250 \times 590 = 36,9 \text{ дм}^3$
Висота холодильника морозильника	$H = h_{ХК} + h_{МК} + 2 \times \delta_{МК} + \delta_{ХК} = 902 + 717 + 2 \times 68 + 45 = 1800 \text{ мм}$
Застосовані хладони	R-134a, R-409a ($t_{\text{кипіння}} = -29^\circ \text{ C}$)
Напруга живлення	220 В, однофазна, частота струму 50 Гц

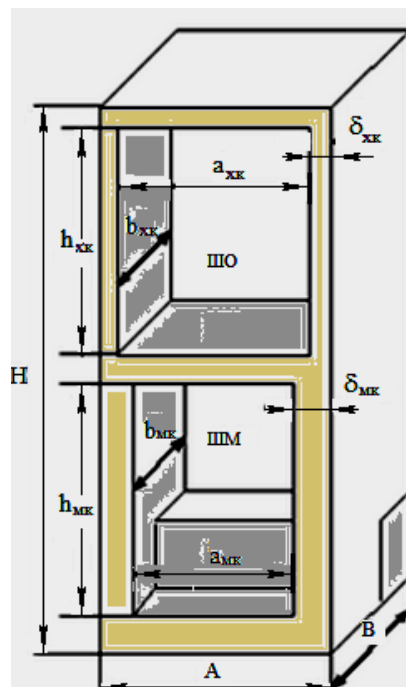


Рис.1.5. Розрахункова модель холодильника з основними розмірами

підлягає вирішенню питання розробки підсистми комп'ютерного розрахунку розподілу поля температури конвекцією повітря у морозильній і холодильній шафах стаціонарного холодильника морозильника. Розрахункову модель холодильника з основними розмірами наведено на рис. 1.5.

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		18

2. ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ ХОЛОДИЛЬНИКА МОРОЗИЛЬНИКА

2.1. Принципова схема та цикл компресійної холодильної машини

Принципова схема і цикл компресійної холодильної машини (з регенеративним теплообмінником) наведено на рис.1.6.

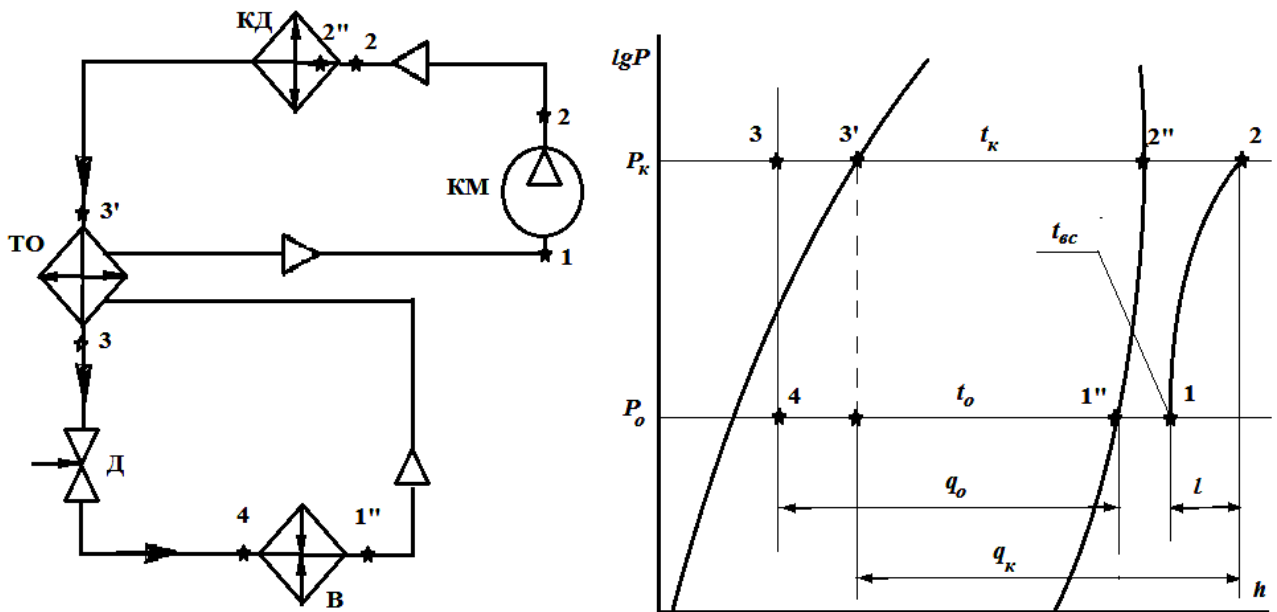


Рис.1.6. Принципова схема (ліворуч) та цикл холодильної машини з регенеративним теплообмінником (праворуч)

Принцип роботи холодильної машини побутового приладу наступний. Пара хладону, яка утворюється внаслідок кипіння хладону у випарнику, всмоктується компресором КМ. В компресорі пара стискується (при цьому температура і тиск його збільшуються), а потім пар високого тиску нагнітається через трубопровід до конденсатора КД. В конденсаторі пар хладагенту охолоджується повітряним середовищем і конденсується, перетворюючись у рідину. Далі рідина хладону по трубопроводу потрапляє до дросілюючого органу Д, в якому проходить її дроселювання з різким спадом тиску і температури. Із дросілюючого органу хладон потрапляє у випарник В, в якому він кипить, в наслідок чого він перетворюється із рідини

у пар який всмоктує певну кількість теплоти від об'єкта охолодження (холодильної шафи). Пар хладону по всмоктуючому трубопроводу далі спрямовується до компресора, але після попереднього підігріву у регенеративному теплообміннику, утвореному капілярною трубкою і ретельно з'єднаною з всмоктуючим патрубком. Переохолодження рідини сприяє збільшенню холодильної продуктивності, а перегрів пари у всмоктуючому трубопроводі зменшує об'ємні втрати, а також збільшує холодильну продуктивність компресора. Окрім того, при наявності теплообмінника припускається деяке переповнення випарника хладоном без небезпеки гідравлічного удару та з'являється можливість краще утворити повертання масла з випарника до компресора.

Цикл фреонової холодильної машини з теплообмінником наведено на рис.1.6. Для побудови робочого циклу у діаграмі $h-lgP$ задаються конкретними параметрами: температурою кипіння t_o ; температурою конденсації t_k ; температурою всмоктування $t_{вс}$. На початку визначають тиски p_o і p_k по відповідним температурам та проводять дві горизонтальні прямі - ізобари p_o і p_k . Перетин ізобари тиску кипіння p_o з кривою насиченого пару вказує стан хладону на виході з випарника (точка 1" на діаграмі). Перегрів пару виникає у теплообміннику і у всмоктуючому трубопроводі до компресора при тиску p_o і температурі $t_{вс}$. Точка всмоктування 1 лежить на перетині ізобари p_o і ізотерми $t_{вс}$ в області перегрітої пари. При стисканні пари в компресорі тиск зростає до p_k , а сам процес стискання вважається адіабатичним, точка кінця стискання 2 лежить на перетину адіабати, проведеної від точки 1 і ізобари p_k . Температура цієї точки має назву температури нагнітання компресора. Із компресора перегріта пара хладону потрапляє до конденсатора, де вона охолоджується до стану насичення (точка 2") , а потім конденсується при постійній температурі до

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		20

стану насиченої рідини (точка 3'). Процес переохолодження (3 - 3') протікає у теплообміннику, і точка 3 визначається із співвідношення ентальпій $h_3 = h_1 - h_1''$, звідки $h_3 = h_3' + h_1' - h_1$.

Переохолоджена рідина потрапляє до дрослюючого органу Д де дроселюється до тиску кипіння p_o при $h = const$. Лінії ізоентальпії (проходять вертикально униз до перетину з ізобарою p_o . У стані вологої пари (точка 4) хладон потрапляє у випарник, де кипить при постійних температурі і тиску кипіння до стану насиченої пари (точка 4). Цикл замикається і повторюється заново.

Таким чином, дійсний цикл холодильної машини складається з наступних процесів:

- 1' - 1 - перегрів пари на всмоктуванні до компресора при $p_o = const$;
- 1 - 2 - адіабатичне стискання в компресорі від p_o до p_k при $s = const$;
- 2 - 2'' - збиття перегріву у конденсаторі при $p_k = const$;
- 2'' - 3' - конденсація пари в конденсаторі при $p = const$;
- 3' - 3 - переохолодження рідини хладону при $p_o = const$;
- 3 - 4 - дроселювання від p_k до p_o при $h = const$;
- 4 - 1'' - кипіння рідини у випарнику при $p_o = const$ і $t_o = const$.

Для кожної вузлової точки визначають усі термодинамічні параметри і складають таблицю їх значень. Знаючи параметри вузлових точок циклу, можна визначити параметри теоретичного циклу, а саме:

1. Питому масову холодильну продуктивність хладону (кДж/кг)

$$q_o = h_{1''} - h_4 ;$$

2. Питому роботу стискання в компресорі (кДж/кг)

$$l_T = h_2 - h_1 ;$$

3. Питоме теплове навантаження на конденсатор (кДж/кг)

$$q_k = h_2 - h_{3'} ;$$

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
						21
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Холодильний коефіцієнт циклу

$$\varepsilon_T = \frac{q_0}{l_T};$$

Цей коефіцієнт характеризує ККД циклу і використовується для порівняння ефективності роботи різних компресійних машин: чим вище він, тим краще.

Знаючи параметри теоретичного циклу встановлюють параметри дійсної холодильної машини, яка має компресор з теоретичною об'ємною продуктивністю

$$V_T = \frac{\pi D^2}{4} S \cdot z \cdot n,$$

де D - діаметр циліндра, м; S - хід поршня, м; z - кількість циліндрів; n - частота обертання, с^{-1} .

Діюча об'ємна продуктивність компресора ($\text{м}^3/\text{с}$)

$$V_d = \lambda V_T,$$

де λ - коефіцієнт подачі компресора, який враховує загальні об'ємні втрати $\lambda = 0,5 \dots 0,75$.

За даними діючої об'ємної продуктивності обирають компресор або агрегат по каталогу чи табличне.

Теоретичну об'ємну продуктивність можливо знаходити і таким чином

$$V_T = M_{\text{км}} v_{\text{вс}} / \lambda,$$

де $v_{\text{вс}}$ - питомий об'єм всмоктуваної пари, $\text{м}^3/\text{кг}$; $M_{\text{км}} = \sum Q/q_0$ - масова витрата хладону, необхідного для відбору усіх тепло припливів.

Холодильна продуктивність компресора

$$Q_0 = \sum Q, \text{ або } Q_0 = M_{\text{км}} q_0.$$

Навантаження на конденсатор

$$Q_k = M_{\text{км}} q_k.$$

Теоретична потужність компресора

$$N_T = M_{\text{км}} l_T.$$

Дійсна споживана потужність від мережі живлення компресора

$$N_{\text{э}} = N_T / \eta_{\text{э}},$$

										Лист
										22
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

$\eta_{\text{э}}$ - ККД компресора.

Дійсний холодильний коефіцієнт

$$\varepsilon_T = \frac{Q_0}{N_{\text{э}}},$$

який майже у двічі менший за теоретичний холодильний коефіцієнт циклу ε_T .

2.2. Моделювання задачі розподілу поля температур у повітрі шаф холодильника

Температурний режим в морозильному відділенні КХП типу КШД встановлюється терморегулятором залежно від температури у ШО. За конструкцією більшості ХМ, чим вище середнє значення температури у ШО тим вище воно і в морозильному відділенні, тобто виробником ХМ між ними закладається пряма пропорційна залежність.

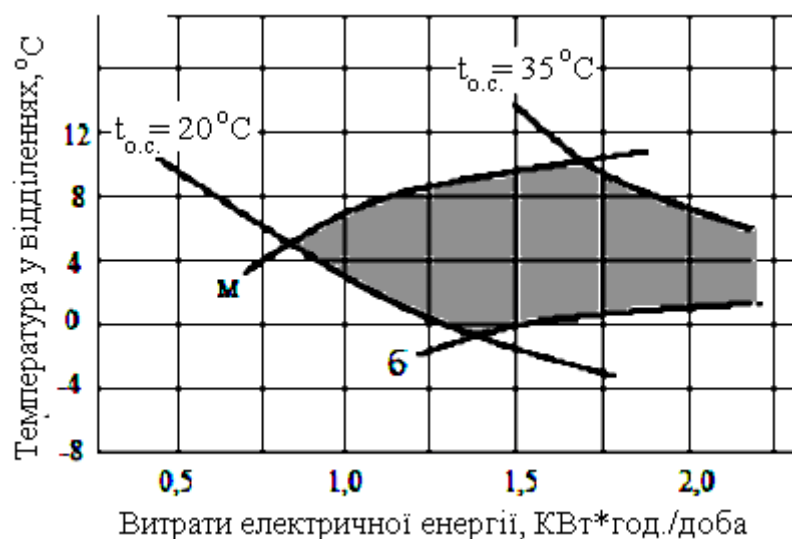


Рис.1.7. Залежність витрат електричної енергії споживаної двигуном привода компресора ХМ від температури у шафі охолодження та оточуючого середовища і при положенні уставки парового терморегулятора з „більшим” (б) та „меншим” (м) охолодженням

повторюється в ітераційному циклі, при умові отримання збіжності результатів розрахунків, і завершується за показником відносної розбіжності значень температур, отриманих у попередній та наступній ітераціях.

Перенос тепла будь-якою рухомою речовиною визначається законами збереження її маси, кількості руху і енергії та має вид диференційних рівнянь, що пристосовані до елементарного об'єму середовища, крізь поверхню якого здійснюється рух. Вирішення складених диференційних рівнянь шляхом їх інтегрування надає можливість визначити обмін тепла конвекцією і, як правило, здійснюється варіаційними методами або чисельно - методом комірок, який застосовує перетворення диференційних рівняння у матрицю алгебраїчних їх аналогів. Кожна утворена комірка повинна характеризуватися фізичними і функціональними властивостями речовини, мати певні розміри і бути пов'язаною з сусідніми комірками межовими умовами.

2.2.1. Постановка задачі моделювання

Спільний перенос теплоти теплопередачею і конвекцією є вирішальним у процесах тепло і масообміну. Якщо конвекція є можливою тільки в рухомому середовищі і пов'язана з його пересуванням, то теплопровідність пов'язують з рухом маси в середовищі, що призводить до його неоднорідності, а, відтак, - дифузії речовини і додатковому переносу теплоти молекулами – дифузій теплопровідності. У більшості випадків дифузною теплопровідністю нехтують. На початку формалізації задачі теплообміну конвекцією встановлюються зв'язки між визначальними фізичними величинами у середовищі, а саме: полем температур з полем швидкості речовини при її русі.

Встановлено, що задача теплообміну конвекцією формалізується диференційними рівняннями законів збереження маси, кількості руху і енергії речовини у середовищі, крізь поверхню якого пересувається тепло, але тільки одно з них - диференційне рівняння переносу енергії відображає

										Лист
										25
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

закон її збереження у середовищі, оскільки вимагає потужності підсумкової енергії, що перетікає через поверхню виділеного об'єму до її зміни в самому об'ємі. Швидкість зміни повної - внутрішньої і кінетичної енергії - дорівнює додатку потужностей масових і поверхневих сил діючих в об'ємі та на поверхні середовища, а також енергії потоку від руху молекул у середовищі.

Будь яка термодинамічна система має певний запас повної енергії $E = K + U$, де $K = E_k + E_n$ - кінематична енергія, що складається з кінетичної енергії руху системи $E_k = \rho \bar{v}^2 / 2$ або швидкісного напору і потенціальної енергії робочого тіла системи $E_n = \rho gh \approx 0$, в яких ρ, \bar{v}, g, h - густина, вектор швидкості речовини середовища, прискорення вільного падіння та висота тіла над поверхнею моря, відповідно. Величина $U = U_k + U_n + U_0$ є внутрішньою енергією яка складається з кінетичної енергії руху молекул, їх потенціальної енергії взаємодії і енергії при температурі абсолютного нуля, від якої відраховують усі зміни енергії, а тому вважають $U_0 = 0$.

Оскільки показник внутрішньої енергії U залежить від ваги системи, в термодинаміці застосовують поняття питомої внутрішньої енергії $u_{num.} = U/\rho$, тобто внутрішню енергію речовини вагою у 1 кг. Рівняння енергії, що переноситься конвекцією може бути складеним на підставі рівняння переносу маси речовини

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = -\nabla \cdot \bar{J}_\rho + I_\rho, \quad (2.1)$$

де $\rho, \bar{v}, \bar{J}_\rho, I_\rho, t$ - густина речовини, вектор її швидкості, густина потоку молекул речовини, потужність джерела речовини, час. Якщо замість густини речовини застосувати повну енергію її одиничного об'єму $\rho \equiv E$, то така підстановка надає змогу надати повну енергію речовини як

$$E = \rho e = \rho \left(u_{num.} + \frac{\bar{u}^2}{2} \right), \quad (2.2)$$

де e - питома повна енергія, що приходить на 1 кг речовини. Обмін теплом із оточуючим середовищем здійснюється через поверхню об'єму речовини - конвекцією та дифузиею, а також за рахунок поверхневих сил.

						Лист
					ДП ЕН-141а 1.12	26
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Густина потоку енергії \bar{J}_E із урахуванням потоку внутрішньої енергії речовини \bar{J}_U , утвореного ним тензором механічних напруг $\bar{\sigma}$ на поверхні об'єму і вектора її швидкості \bar{v} , становить $\bar{J}_E = \bar{J}_U + \bar{\sigma} \cdot \bar{v}$. Джерела теплової енергії, розташовані в об'ємі, характеризуються роботою масових сил як $I = \rho \bar{F} \cdot \bar{v}$. Диференціальне рівняння переносу повної енергії, із урахуванням того, що потік внутрішньої енергії теплового характеру внаслідок розгляду рідини або пари хладону, як неізотермічної речовини $\bar{J}_U = \bar{q}$, має вид

$$\frac{d(\rho e)}{dt} + \nabla \cdot (\rho e \bar{v}) = -\nabla \cdot \bar{q} - \nabla \cdot (\bar{\sigma} \cdot \bar{v}) + \rho \bar{F} \cdot \bar{v}. \quad (2.3)$$

Ліва частка рівняння (4.3) є повна енергія $E = \frac{d(\rho e)}{dt} + \nabla \cdot (\rho e \bar{v})$, а права - внутрішня $U = -\nabla \cdot \bar{q}$ і кінетична $K = -\nabla \cdot (\bar{\sigma} \cdot \bar{v}) + \rho \bar{F} \cdot \bar{v}$ енергії.

Вектор швидкості речовини є пов'язаним з її температурою, отже диференціальне рівняння переносу кількості руху (2.3) перетворюється до виду

$$\frac{d(\rho \bar{v})}{dt} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla \cdot \bar{\sigma} + \rho \bar{F}. \quad (2.4)$$

Зробивши скалярне множення на вектор швидкості \bar{v} , отримаємо з нього диференціальне рівняння кінетичної енергії

$$E_k = \left[\frac{d(\rho \bar{v})}{dt} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) \right] \bar{v} = -\nabla \cdot \bar{\sigma} \cdot \bar{v} + \rho \bar{F} \cdot \bar{v} m, \quad (2.5)$$

а, після перетворення лівої частини виразу до виду

$$\begin{aligned} \left[\frac{d(\rho \bar{v})}{dt} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) \right] \bar{v} &= \left[\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\rho \bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} \right] \cdot \bar{v} = \\ \rho \frac{\partial (v^2/2)}{\partial t} + (\rho \bar{v} \cdot \nabla) v^2/2 &= \frac{d(\rho v^2/2)}{dt} + \nabla \cdot [\rho \bar{v} (v^2/2)] \\ &= \frac{\partial E_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v} E_k), \end{aligned} \quad (2.6)$$

диференціальне рівняння кінетичної енергії середовища матиме вигляд

$$\frac{\partial E_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v} E_k) = -\nabla \cdot \bar{\sigma} \cdot \bar{v} + \rho \bar{F} \cdot \bar{v}. \quad (2.7)$$

Виконуючи заміну тензора в'язких напруг $\bar{\sigma}$ отримуємо диференціальне рівняння кінетичної енергії у вигляді

						Лист
					ДП ЕН-141а 1.12	27
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

В прямокутній системі координат і для стаціонарного режиму рівняння переносу енергії матиме вигляд

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) - \frac{\bar{v}}{\rho c_p} : (\nabla \cdot \bar{v}), \quad (2.14)$$

Отже, розрахунок поля температур, при наявності рухомої речовини - газу, повітря, рідини тощо, повинний мати попередній розрахунок поля швидкостей і навпаки.

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		29

3. ЗАСТОСУВАННЯ ПЕОМ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ТЕПЛОМАСООБМІНУ

COMSOL Multiphysics - це потужне інтерактивне середовище щодо моделювання і розрахунку більшості наукових і інженерних задач започаткованих на диференційних рівняннях у приватних похідних (PDE) методом кінцевих елементів. Він надає можливість розширити стандартні моделі які використовують одне диференційне рівняння (прикладний режим) у мультифізичні моделі для розрахунку пов'язаних між собою фізичних явищ. Розрахунок не вимагає глибоких знань математичної фізики і методу кінцевих елементів. Це можливо завдяки вбудованими фізичними режимами, де коефіцієнти диференційних рівнянь задаються у вигляді зрозумілих фізичних властивостей, таких як: швидкість, теплопровідність, теплоємність, коефіцієнт тепловіддачі, об'ємна потужність тощо у залежності від обраного фізичного розділу. Перетворення цих параметрів у коефіцієнти математичних рівнянь виконується автоматично. Взаємодія з програмою можлива стандартним шляхом - через графічний інтерфейс користувача (GUI), або програмуванням за допомогою скриптів на мові COMSOL Script або мові MATLAB. В роботі буде застосовуватись графічний інтерфейс.

Програмування в цьому середовищі започатковане на системі диференційних рівнянь в приватних похідних. Існує три математичні способи завдання таких систем:

- коефіцієнтна форма, яку призначено для лінійних і близьких до лінійних моделей;
- генеральна форма, для нелінійних моделей;
- слабка форма (Weakform) для моделей с PDE на межах області моделювання, ребрах або для моделей які використовують умови із змішаними та похідними в функції часу.

Застосовуючи ці способи, можливо змінювати типи аналізу, включаючи:

- стаціонарний і перехідний аналіз;
- лінійний і нелінійний аналіз;

										Лист
										30
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

- модальний аналіз та аналіз власний частот.

Для вирішення диференціальних рівнянь у приватних похідних PDE, COMSOL Multiphysics використовує метод кінцевих елементів (FEM). Програмне забезпечення запускає кінцевоелементний аналіз разом з побудовою сітки, яка враховує конфігурацію тіл і контролює похибку з використанням різноманітних чисельних вирішувачів. Так як більшість фізичних законів може бути наданою у вигляді PDE, стає можливим моделювати широкий спектр наукових і інженерних явищ з багатьох галузей фізики і, у тому числі, явища конвекції і теплопередачі.

Для побудови і розрахунку задачі використовується наступна послідовність дій.

1. Обирається розмірність моделі, визначається фізичний розділ в **Model Navigator [Навігатор моделей]** (кожному розділу відповідає певне диференціальне рівняння) та встановлюємо стаціонарний або нестаціонарний аналіз поля температур повітря.

2. Визначається робоча область і задається її геометрія на робочому столі.

3. Задаються вихідні дані,, залежності змінних від координат і часу.

4. Вказуються фізичні властивості (в'язкість, питому вагу тощо) і початкові умови вільних складових у PDE.

5. Вказуються межові умови.

6. Задаються параметри об'єкта і будується сітку.

7. Встановлюються параметри пристрою вирішувача та запускається розрахунок.

8. Налагоджується режим відображення розрахунку і візуалізація результатів.

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		31

3.1. Робота в COMSOL Multiphysics

3.1.1. Навігатор моделей і головне меню

Обираючи розмірність моделей, слід пам'ятати, що вибір відразу тримірної моделі може призвести до рішення задачі упродовж кількох годин навіть на потужному комп'ютері. Для більшості тримірних задач має сенс на початку обрати двохмірну модель, а потім вже за необхідністю повторити розрахунок в тримірній постановці задачі. Розмірність моделі обирається у вікні **Model Navigator** [Навігатор моделей], рис.3.1. на першій вкладці **New** у **Space Dimension** [Розмірність простору] де окрім **1D**, **2D** та **3D** є **Axial Symmetry (1D)** та **(2D)** для осесиметричних моделей.

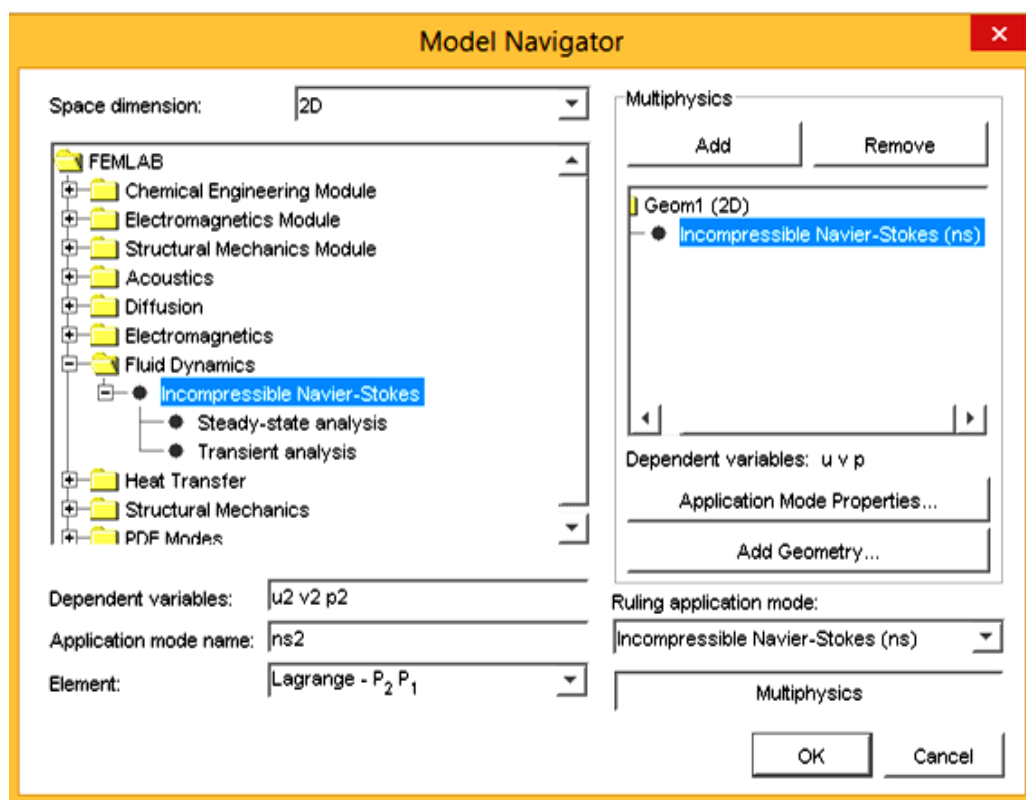


Рис.3.1. Вікно Навігатор моделей

Наступним етапом є вибір фізичного розділу **Heat Transfer** [Теплоперенос], який включає в себе підрозділ **Convection and Conduction** [Конвекцію і кондукцію] до якого окрім теплофізичних властивостей можна додавати поле швидкостей речовини. Цей розділ започатковує рівняння Лапласа для нестикаємої рідини.

Options - утримує команди завдання робочої області **Axes/Gridsettings**, констант **Constants**, рівнянь **Expression**, функцій **Function**, пов'язаних змінних **CouplingVariables** і різні настройки відображення елементів та масштабу.

Draw - утримує команди побудови і перетворення геометричних об'єктів, а також команди перетворення двовірних об'єктів у трьохвимірні.

Physics - утримує команди завдання фізичних властивостей підобластей **Subdomain**, межових умов **Boundary**, у тому числі періодичних межових умов **Periodic Condition** та зміни диференціальних рівнянь **Equation system**.

Mesh - утримує команди управління кінцево-різностною сіткою.

Solve - утримує команди управління вирішувачем, можливо ограти залежність від часу, лінійність або нелінійність, а також вказати інші параметри вирішувача.

Postprocessing - утримує команди для відображення результатів обчислень, в усіх можливих видах: від векторів і поверхонь рівня, до графіків та інтегралів уздовж меж.

Multiphysics - відчиняє **Model Navigator** і дозволяє перемикатися між фізичними режимами в мультифізичних моделях.

3.1.3. Робоча область і завдання геометрії

Для завдання меж відображеної робочої області слід натиснути **Options** і обрати **Axes/Grid settings [Опції > Установки осі/ решітки]**. Для двовірної моделі обираємо область моделювання $x=4$ метри у довжину і $y=3$ метри по висоті. Для цього на відкритому вікні обираємо вкладку **Axes[Осі]** і вимикаємо позначку **Axesequal**. В позиціях **x-ylimits** встановлюємо $x_{\min}=0$, $x_{\max}=4$, $y_{\min}=0$, $y_{\max}=3$. На вкладці **Grid [Решітка]** знімаємо галочку **Auto** власноруч встановлюємо інтервал решітки. Зазвичай при побудові моделі можна задавати просто координати відповідних фігур на робочому столі. Після задання решітки будуємо контури фігури холодильника, застосовуючи головне меню: **Draw>Specifyobjects**, скориставшись кнопками

									Лист
									34
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

результати обчислень. На зображенні об'єкта розрахунку будується поле температур тощо. У випадку **2D** задачі режим постобробки наступний. Опція **Surface Plot** виводить значення скалярного потенціала - температури. Опція **Contour Plot** виводить рішення у вигляді ізоліній. Опція **Arrow** виводить скалярне поле температур за допомогою стрілочок. Опція **Streamline plot** виводить скалярне поле температур у вигляді екіпотенціальних ліній тощо.

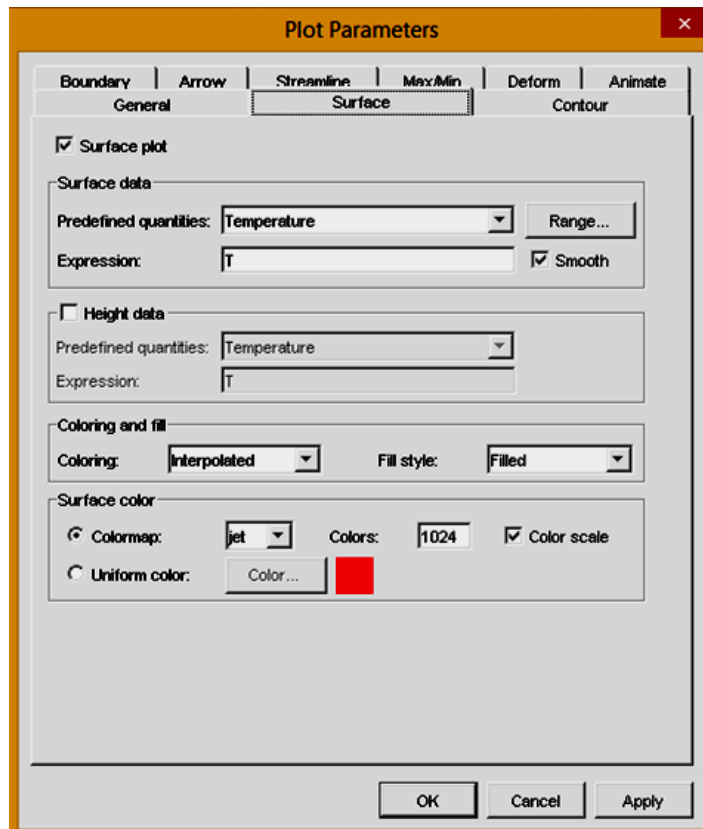


Рис.3.6. Вікно Plot Parameters

4. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР У ШАФАХ ХОЛОДИЛЬНИКА

Під моделюванням вважатимемо застосування методу чисельного дослідження фізичного явища розподілу температури у визначеному геометричному об'ємі холодильника КШ-260 і накладених на нього межових умов та на підставі її диференційного рівняння теплового балансу.

Метою моделювання постає визначення значень і розподілу скалярної величини - температури теплового потоку, який всмоктується випарником холодильної машини побутового холодильника як від об'єкта охолодження в холодильній шафі, так і від об'єкта заморожування в морозильній шафі. Основний випарник з температурою випаровування хладону -28°C розташовано у вигляді двох полиць морозильної шафи, а інший випарник, як продовження основного випарника розташовано всередині запіненою теплоізоляцією видаленої стінки холодильника. В цьому випарнику (охолоджувачі) рухається пара хладону всмоктувана компресором при температурі приблизно $-7...-10^{\circ}\text{C}$ на ділянці випарник - мотор компресорний агрегат. Виходячи з попередніх оцінок теплових потоків у холодильнику типу КШ-260 можна припустити, що кількість теплоти, яку віддає конденсатор у оточуюче середовище $Q_1 = 179 \text{ Вт} \cdot \text{год}$ без завантаження шаф об'єктом охолодження (холостий хід). Кількість теплоти, яку привносить втрати потужності у двигуні герметичного компресора $Q_3 = 93 \dots 150 \text{ Вт} \cdot \text{год}$. Кількість теплоти, яка проникає у шафи холодильника через теплоізоляцію з пінополіуретану $Q_2 = 59 \text{ Вт} \cdot \text{год}$, Кількість теплоти, яка потрапляє до шаф холодильної та морозильній від об'єкта охолодження $Q_0 = 28 \text{ Вт} \cdot \text{год}$. Згідно до ДСТУ в Україні випробування побутового холодильника передбачає його розташування у боксі із штучним кліматом та при температурі $+32^{\circ}\text{C}$. Уставка терморегулятора винна відповідати температурі -18°C до -24°C у морозильній шафі.

										Лист
										40
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

аналогом (алгебраїчними рівняннями), рис. 4.2, та таким в якому враховані геометричні розміри комірки та фізичні властивості їх середовища - теплопровідності, густина, питома теплоємність і наявність витоків та стоків теплоти.

Отже алгебраїзація утворює замість одного диференційного рівняння Лапласа матрицю рівнянь, розмір якої у двомірній постановці задачі дорівнює кількості вузлів комірок на які поділено поверхню розрахунку, рис. 4.2.

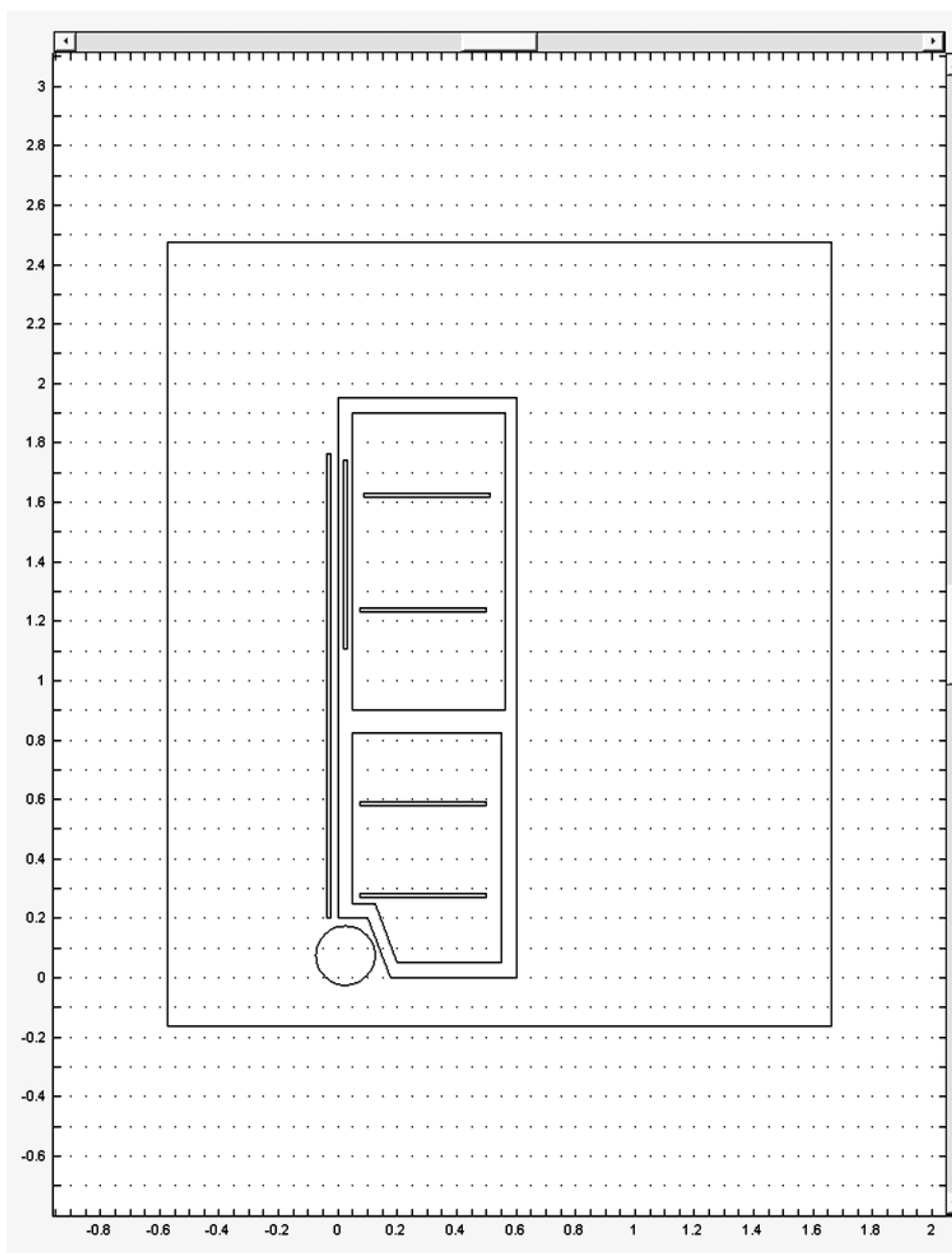


Рис.4.1. Загальний вигляд геометрії області розрахунку побутового холодильника

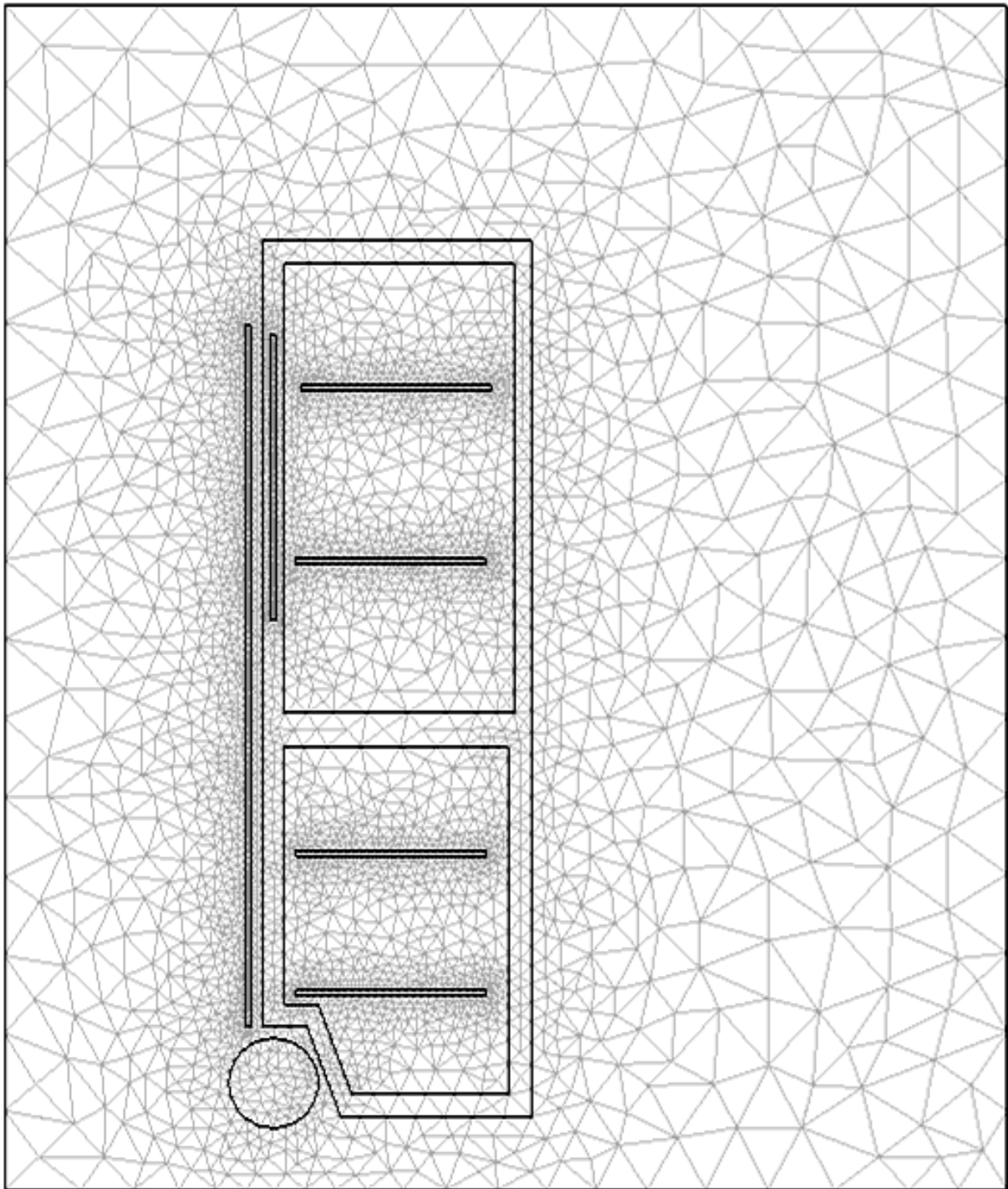


Рис.4.2. Загальний вигляд геометрії області розрахунку побутового холодильника поділеної на елементарні трикутники (триангуляція)

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

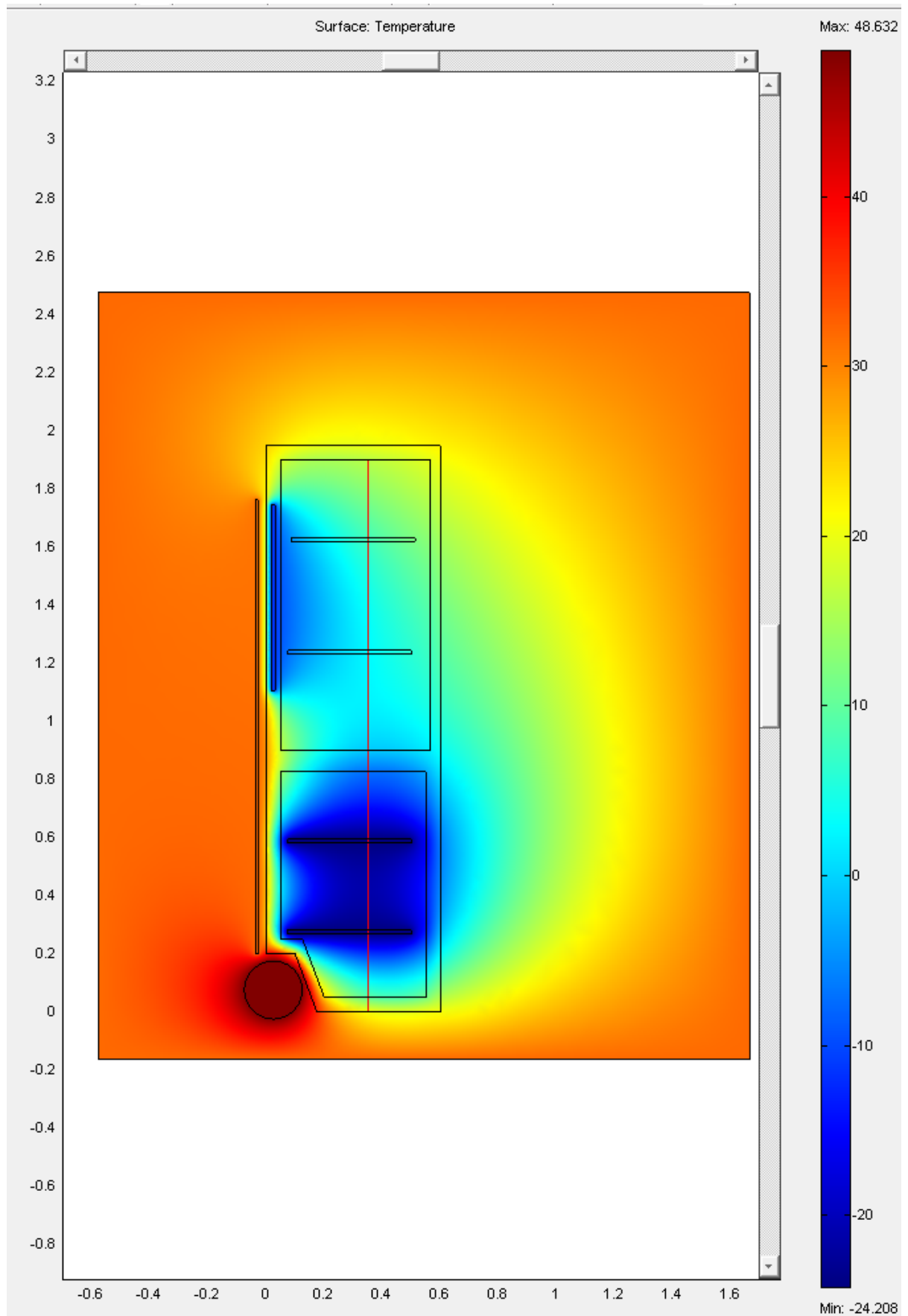


Рис.4.3. Дані розрахунку поля температур у порожньому
ХОЛОДИЛЬНИКУ

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ЕН-141а 1.12

Лист

44

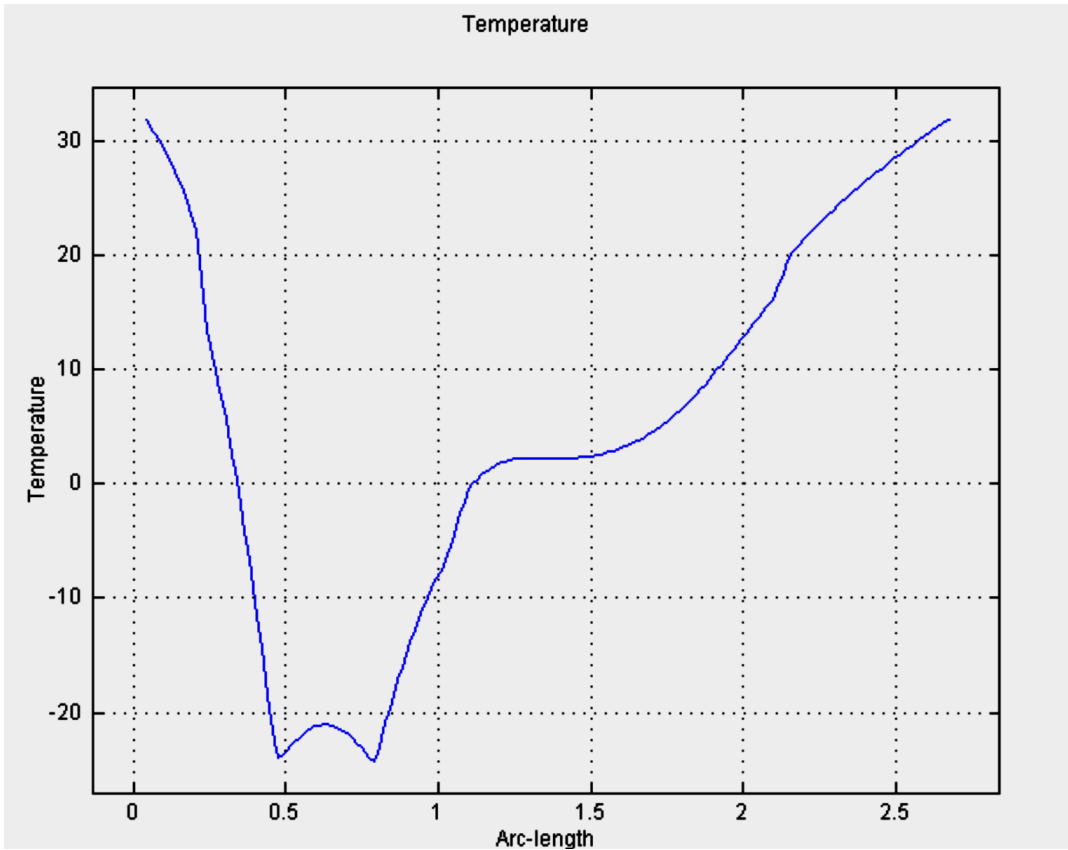


Рис.4.4а. Розподіл поля температур у порожньому холодильнику по висоті від підлоги до стелі уздовж висоти холодильника всередині об'єму шаф

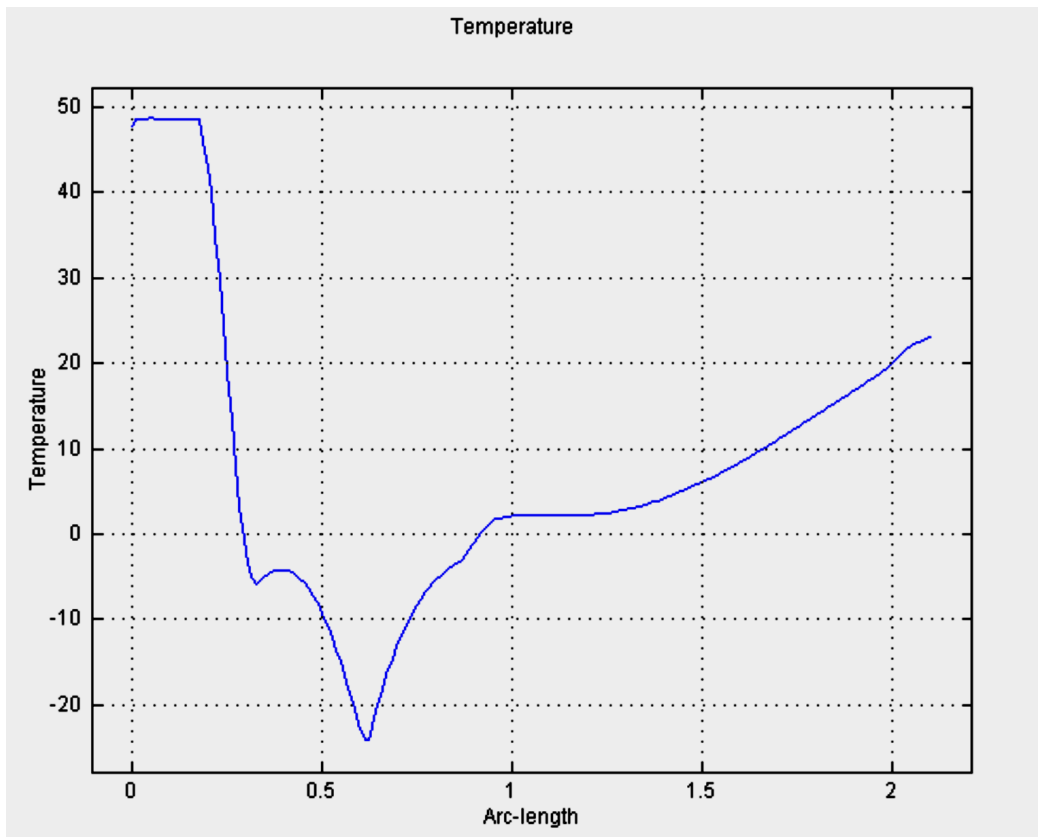
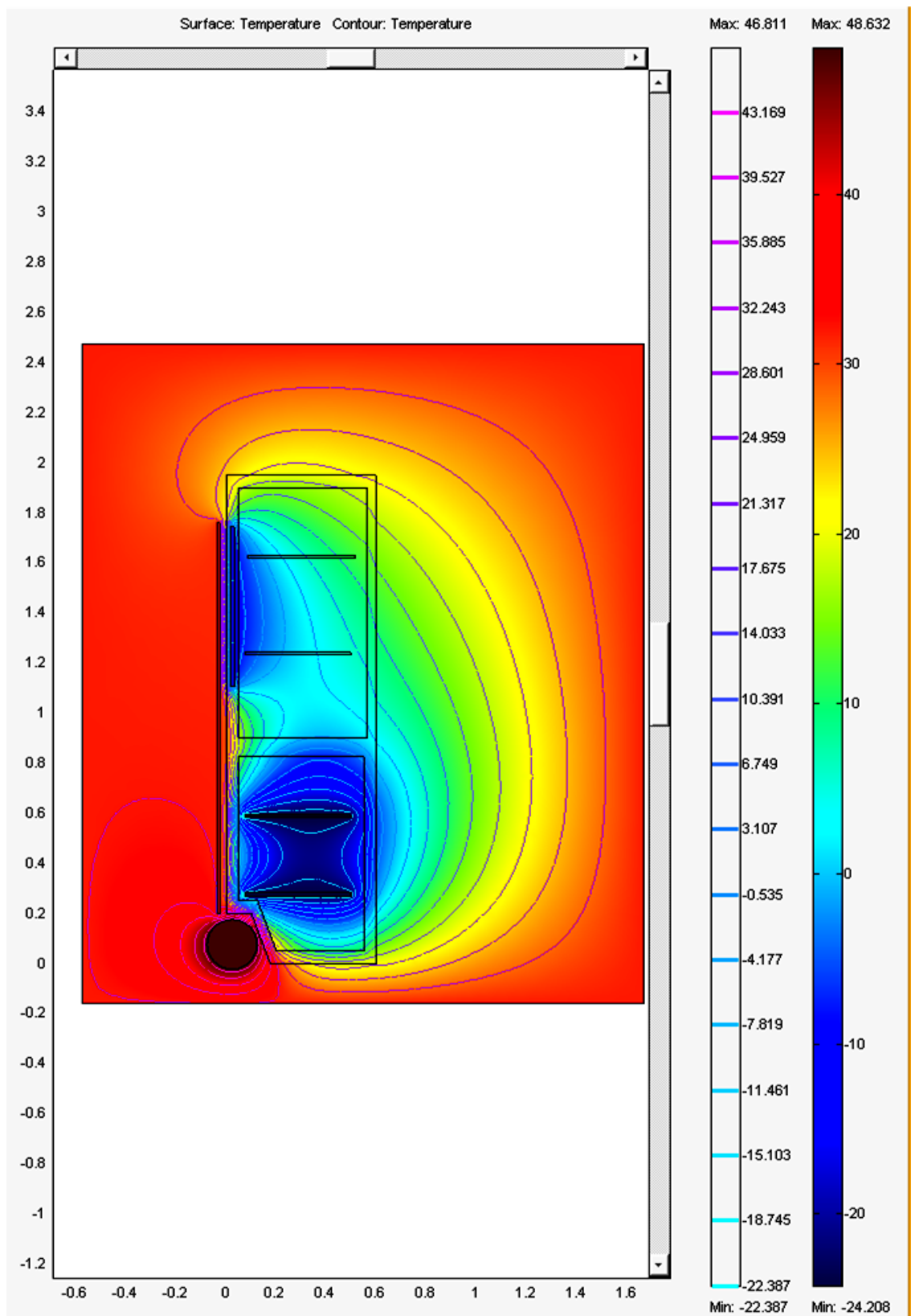


Рис.4.4б. Розподіл поля температур у порожньому холодильнику по діагоналі від низу компресора до правого верхнього кута



холодильнику з еквіпотенціальними лініями температури

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

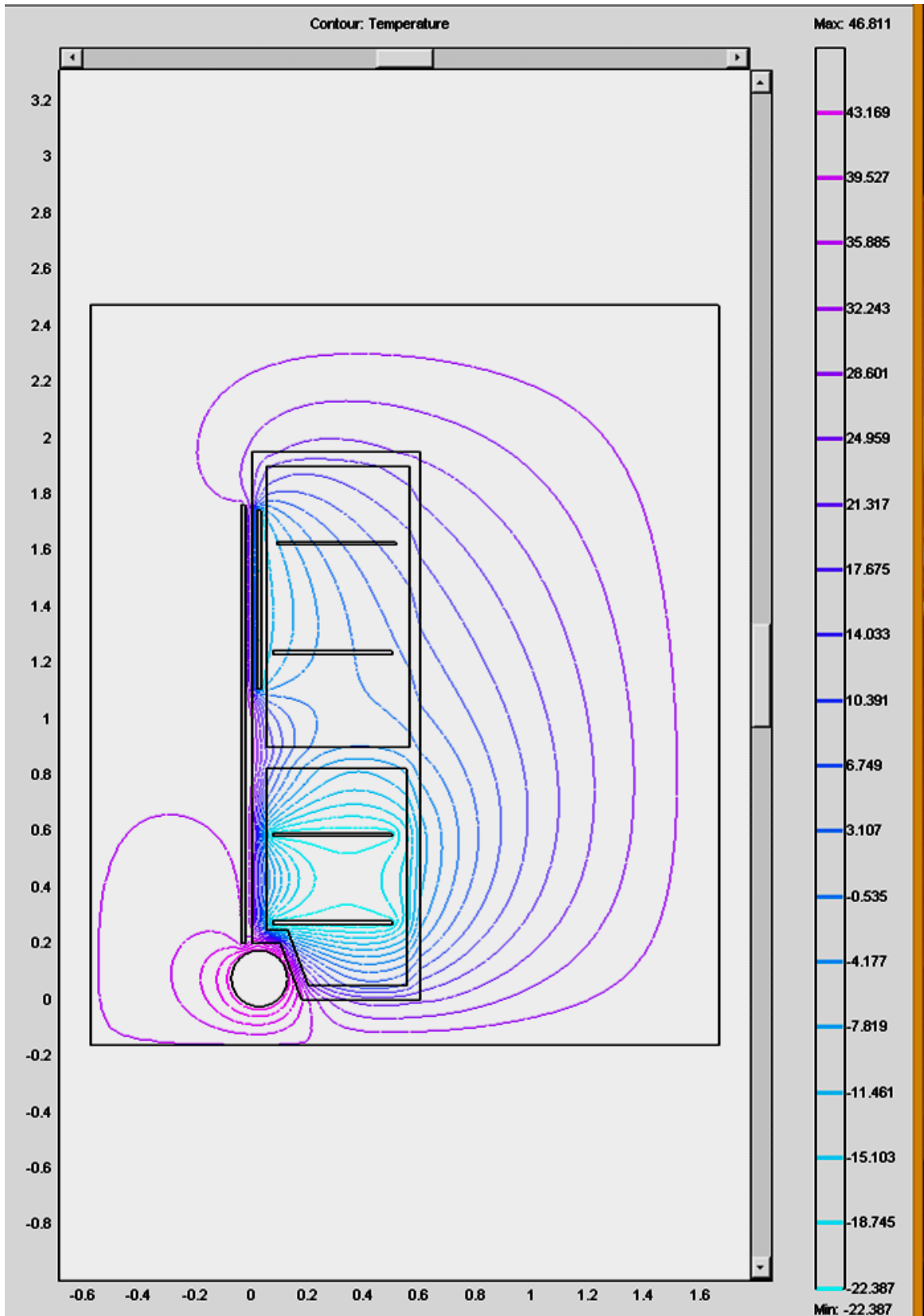


Рис.4.6. Дані розрахунку поля температур у порожньому холодильнику з екіпотенціальними лініями температури

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

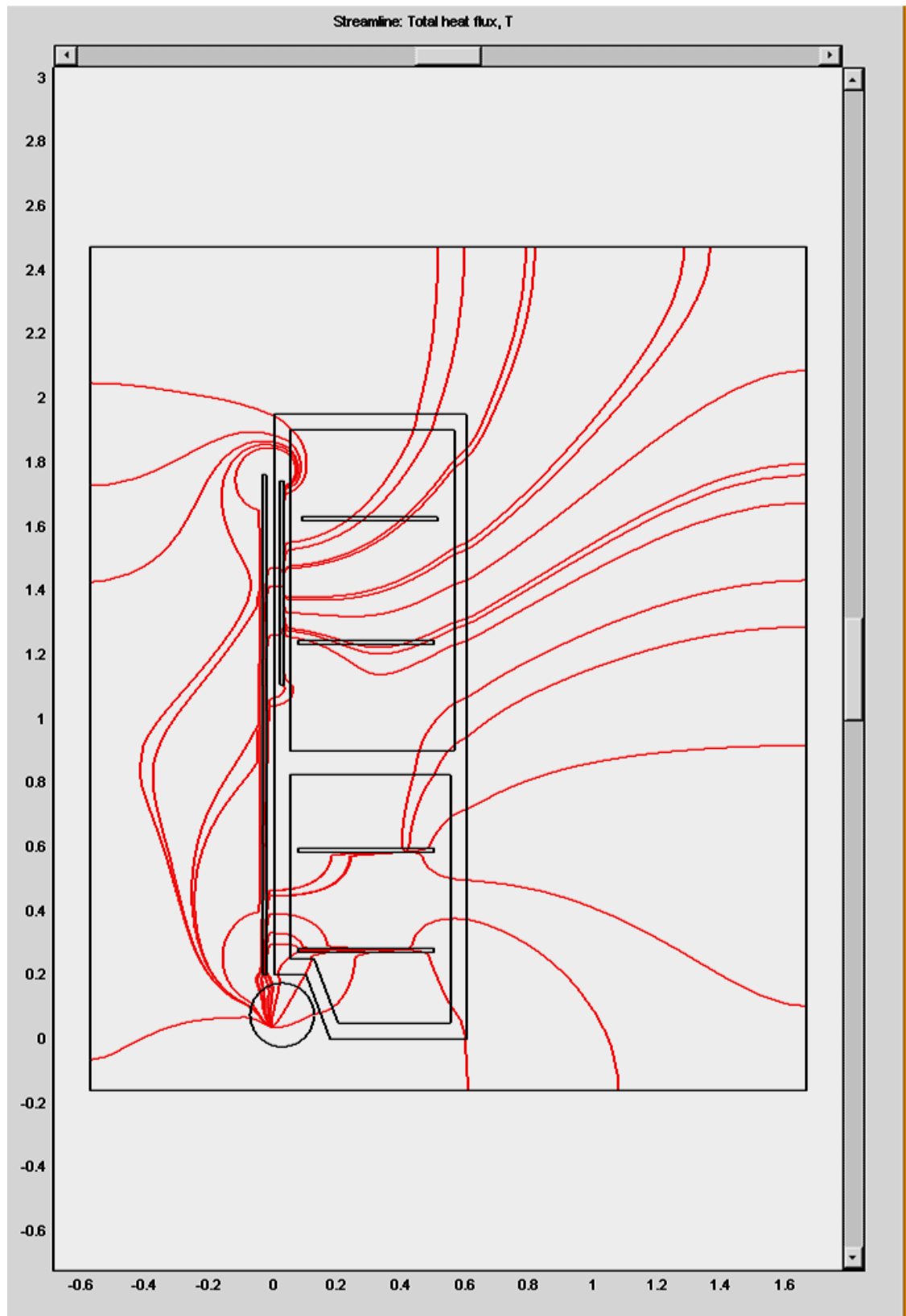


Рис.4.7. Лінії напрямків припливу тепла до випарників
холодильних шаф ззовні у приміщенні та від конденсатора і мотор
компресорного агрегату

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

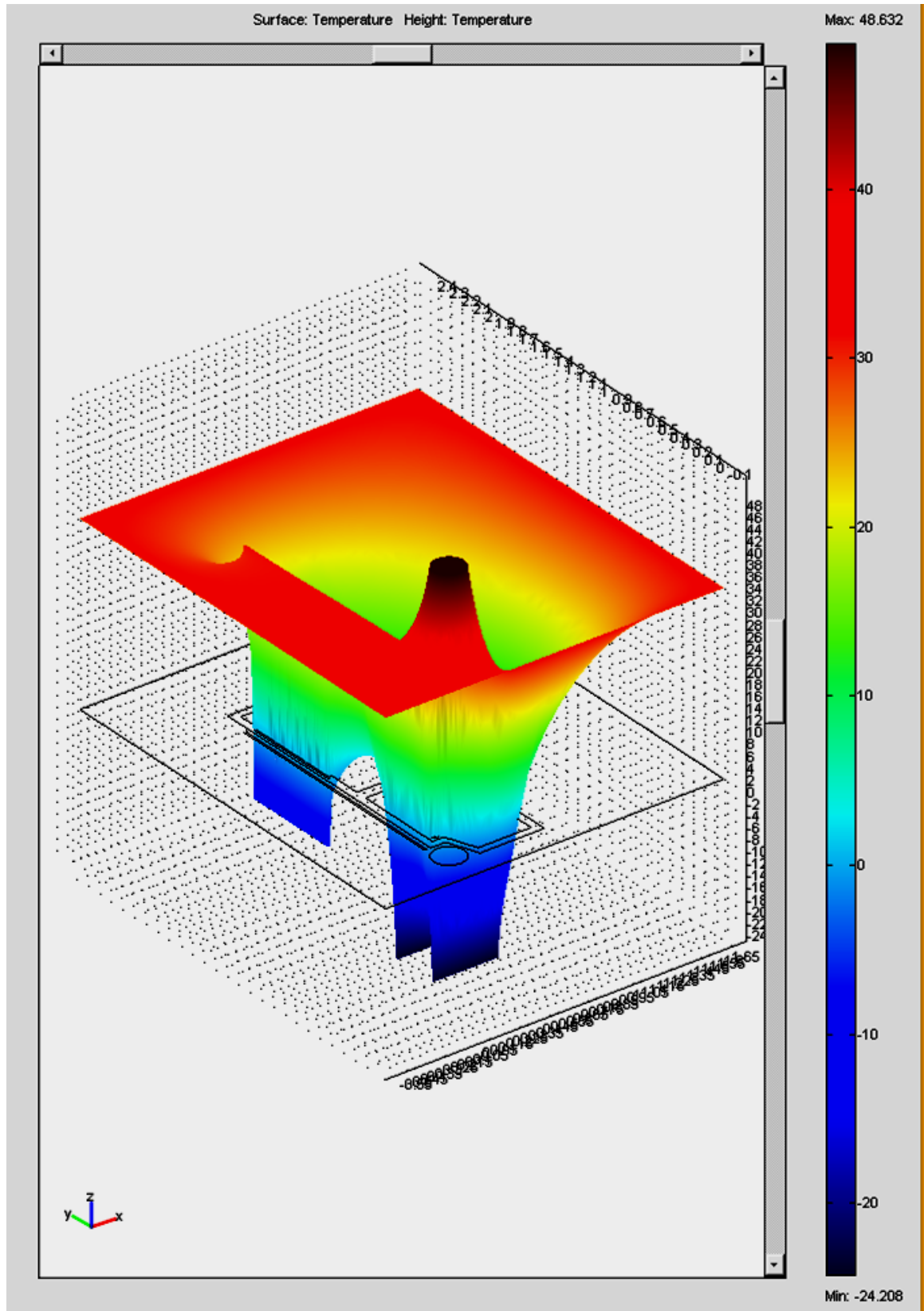


Рис.4.8. Поверхня градієнту температур і її шкала - праворуч у порожньому холодильнику

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

На рис.4.3 наведено результати розрахунку поля температур у просторі в якому знаходиться побутовий холодильник не завантажений об'єктами охолодження, тобто працюючому у режимі холостого ходу. цей розрахунок потрібен як відправна точка для встановлення продуктивності холодильника із завантаженням продуктових шаф.

На рис.4.4а та рис.4.4б наведені графіки розподілу температури всередині побутового холодильника уздовж його висоти від пілоги до стелі та по діагоналі від мотор компресорного агрегату до верхнього кута дверці холодильної шафи. отримані залежності температур свідчать про коректність постановки вирішуваної задачі, завдання межових умов та початкових даних. Як видно з рис.4.4а найнижчу температур у на рівні $-18...-24^{\circ}\text{C}$ має морозильна шафа та таку при якій у холодильній шафі підтримується середня температура $+5^{\circ}\text{C}$, що відповідає експлуатаційним характеристикам холодильника. На рис.4.4б можна бачити порушення умов щодо створення рівномірного розподілу температури у шафі охолодження. Так температура верхнього кута сягає навіть 10°C , що вважається неприпустимим і слід застосовувати заходи щодо усунення такого стану.

На рис 4.5 та рис.4.6 наведено еквіпотенційні лінії рівної температури за якими можна встановити гідність теплоізоляції поверхні холодильних шаф. Отримані дані розрахунку свідчать, що найбільший теплоприплив до шаф холодильника має місце позаду де розташований конденсатор та мотор компресорний агрегат. Також можна бачити, втрати енергоефективності холодильника попереду його оболонки, а саме через недосконалу теплопровідність теплоізоляції холодильник всмоктує тепло із оточуючого середовища - приміщення. Так, температура поблизу холодильника, а саме на поверхні двох морозильників ззовні сягає $+5^{\circ}\text{C}$, що може утворювати конденсат вологи.

На рис.4.7 наведені дані розрахунку ліній напрямків припливу тепла до випарників холодильних шаф із зовні у приміщенні та від конденсатора і

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		520

мотор компресорного агрегату. Ці дані дозволяють встановити місця на поверхні холодильних шаф теплоізоляцію яких слід покращити або зробити товстішою. Як витікає з рис.4.7, найбільша кількість припливу теплоти має місце через теплоізоляцію у верхній частині шафи охолодження із оточуючого середовища. Припливи теплоти від мотор компресорного агрегату також впливові, але вони поглинаються всередині теплоізоляції шаф холодильника і, більш того, теплоізоляція морозильної шафи згідно до конструкції товстіше за шар теплоізоляції холодильної шафи.

На рис.4.8 наведено поверхню розподілу градієнту температури, за якою можна бачити ділянки холодильника і навколо нього із значними або повільними перепадами температури, що є корисним і наочним при поверхневому аналізу роботи холодильника як охолоджуючого пристрою.

Таким чином моделювання поля температур у холодильнику та навколо нього у приміщенні, яке має температуру 32°C , можна вважати успішним, та таким яке доводить коректність побудови чисельної моделі з вирішенні задачі Лапласа - конвекції та тепло і масо переносу. Отримані дані щодо розрахунку поля температур можна застосовувати як відпрані (незалежні початкові умови) для подальшого вирішення задачі при умові розташування у шафах холодильника об'єктів охолодження та заморожування.

4.2. 2D моделювання побутового холодильника з об'єктами охолодження

Моделювання задачі також починається з формування межових умов однозначності шляхом додавання геометричних розмірів, місць розташування і форми об'єктів охолодження у шафах холодильника та фізичних властивостей і теплофізичних даних - щільності, теплоємності;

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		531

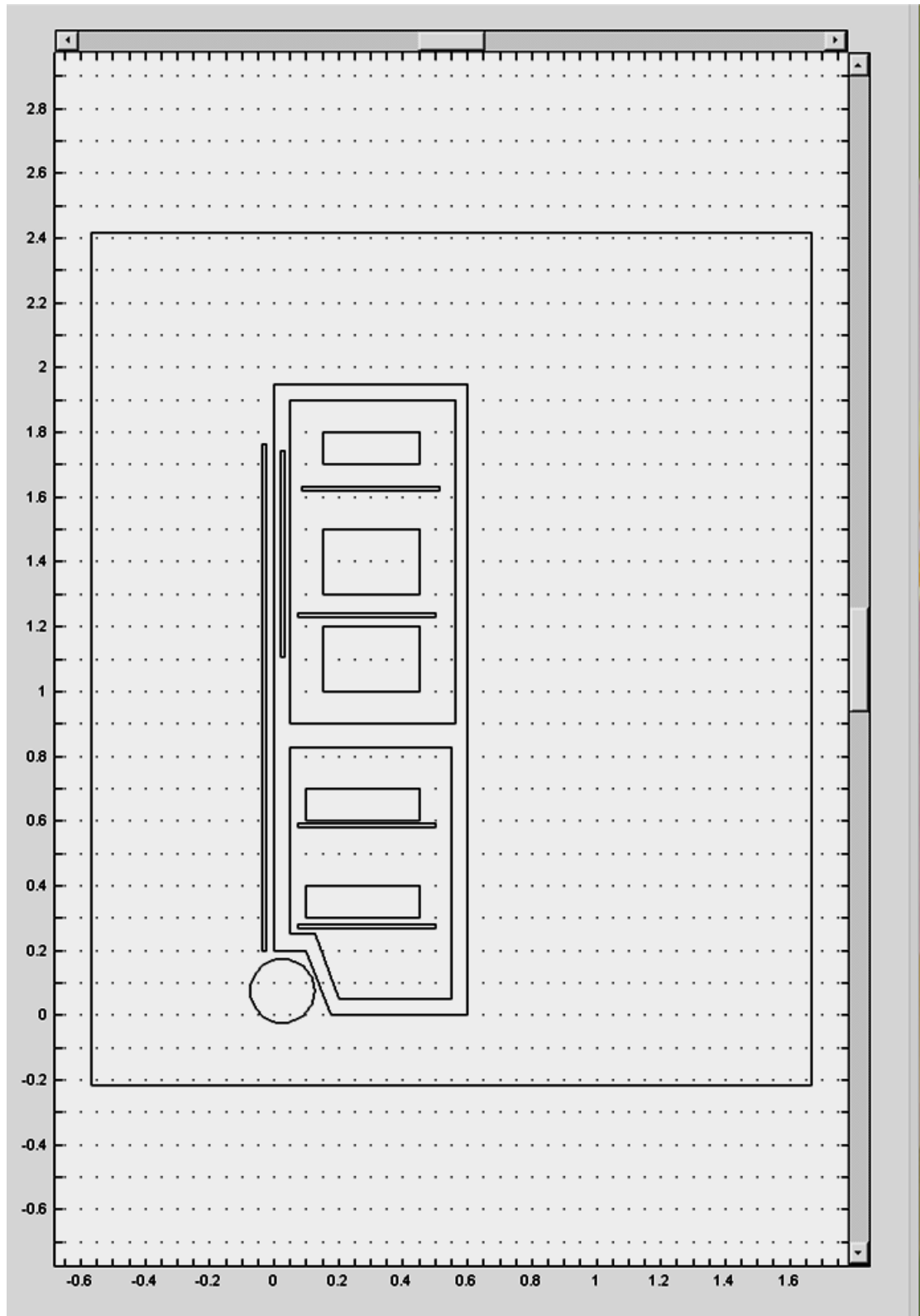


Рис.4.9. Загальний вигляд геометрії області розрахунку побутового холодильника з об'єктами охолодження (пакетами сипікону)

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

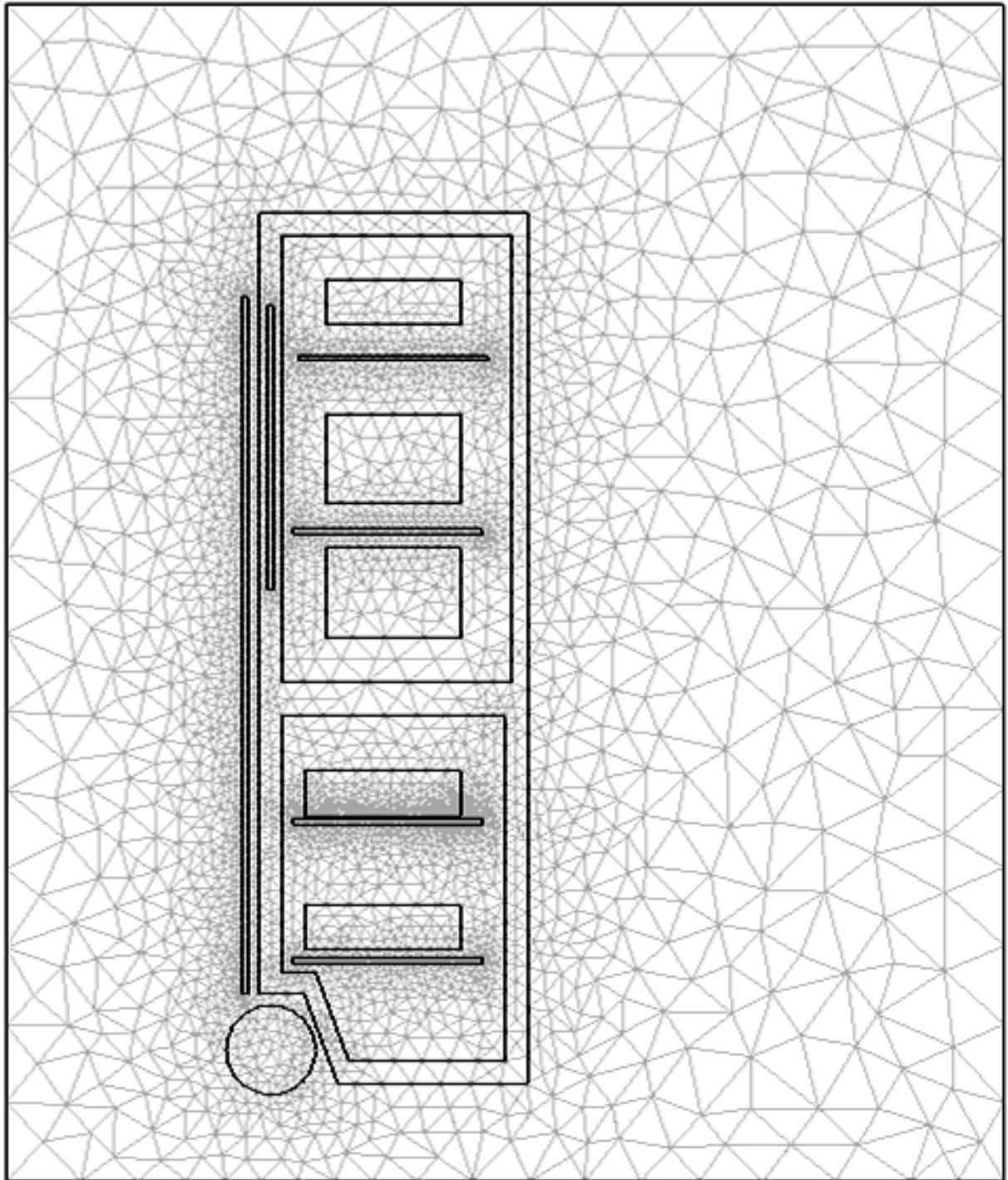


Рис.4.10. Загальний вигляд геометрії області розрахунку побутового холодильника поділеної на елементарні трикутники (триангуляція) із завантаженням шаф охолодження прямокутниками з силікону

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ЕН-141а 1.12

Лист

553

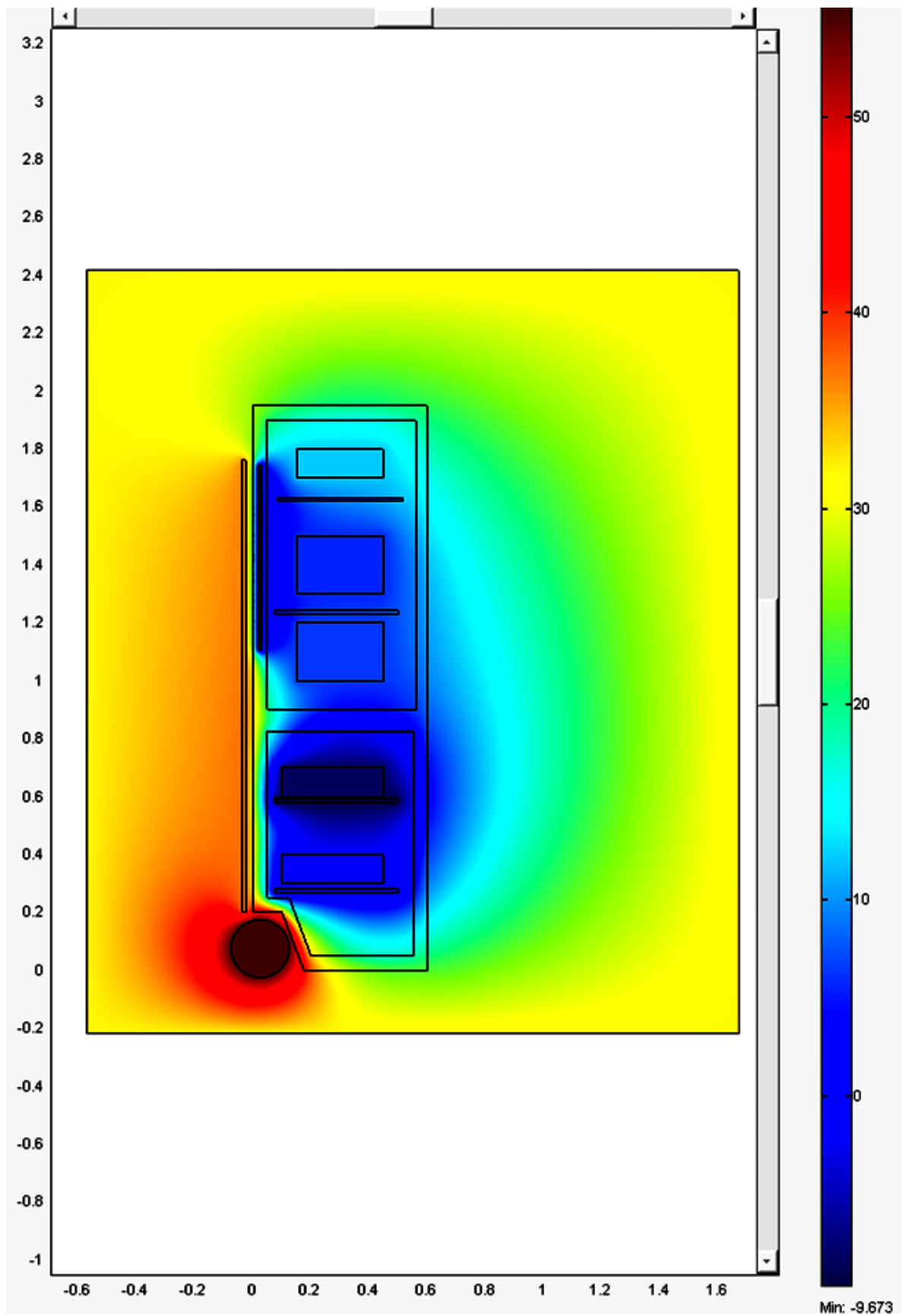


Рис.4.11. Дані розрахунку поля температур у завантаженому холодильнику пакетами з силікону

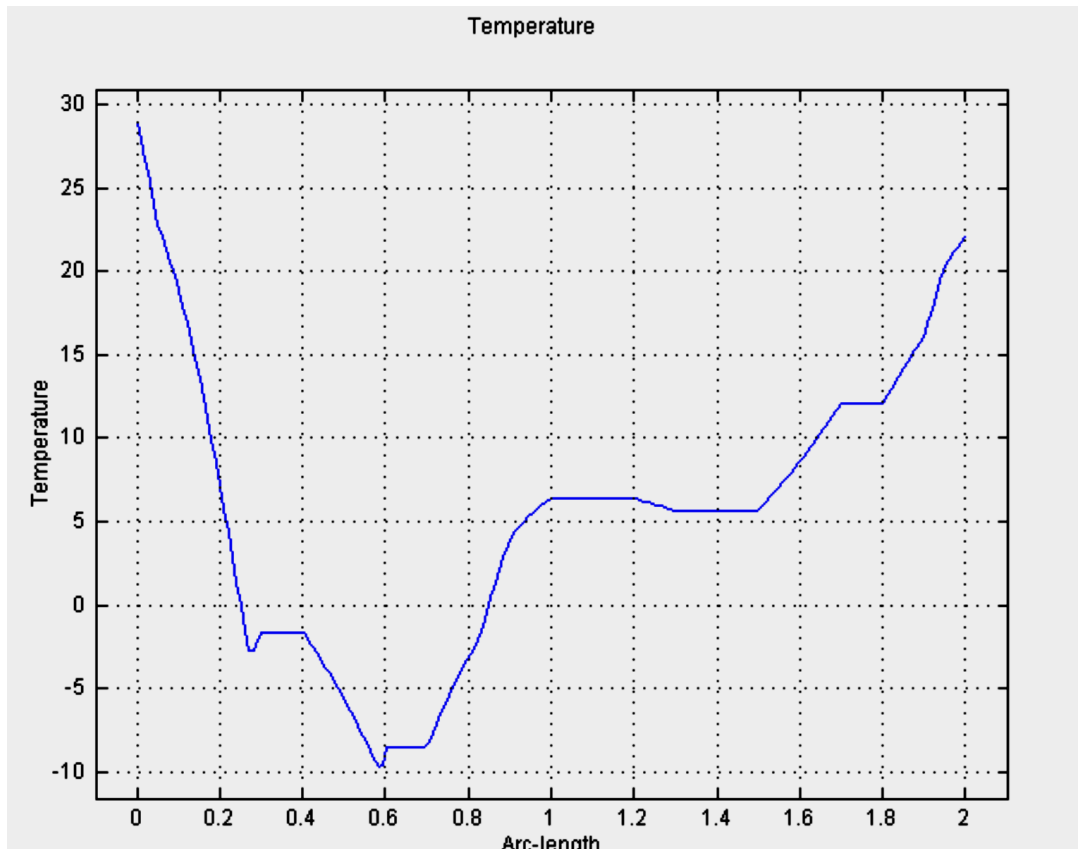


Рис.4.12а. Розподіл поля температур у завантаженому холодильнику по висоті від підлоги до стелі уздовж висоти холодильника всередині об'єму шаф

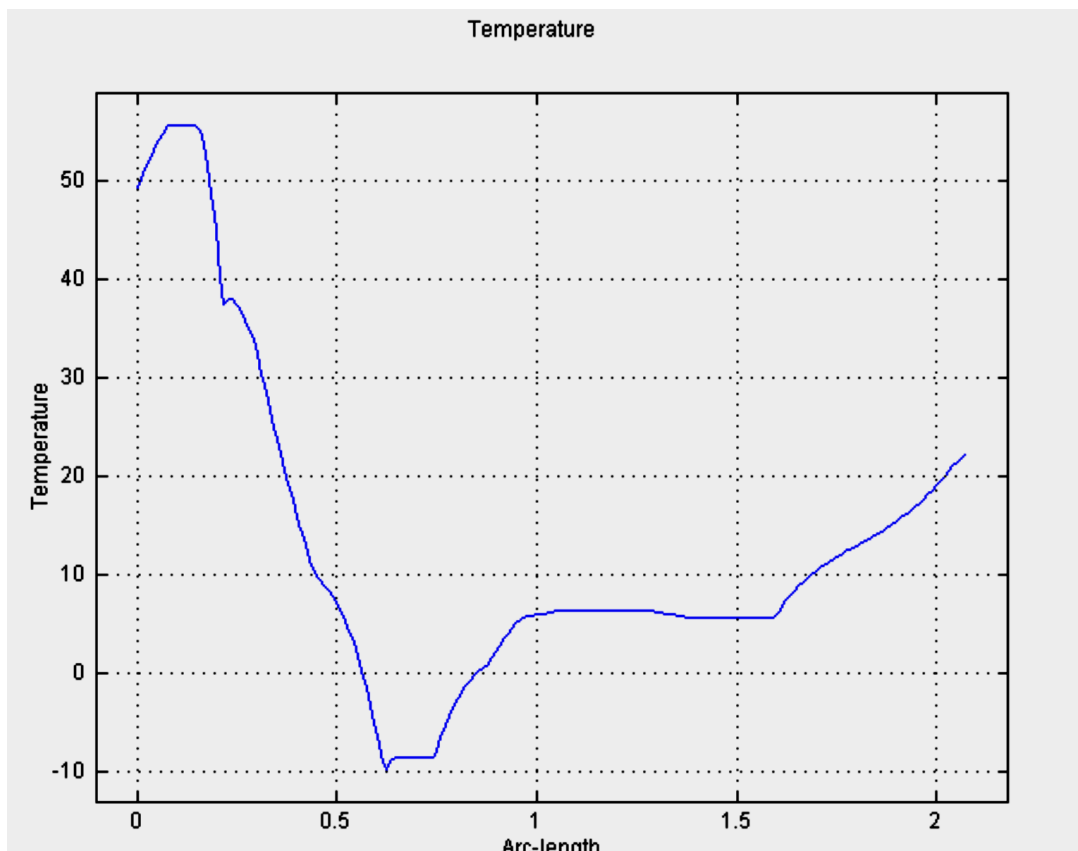


Рис.4.12б. Розподіл поля температур у завантаженому холодильнику по діагоналі від низу компресора до правого верхнього кута шафи

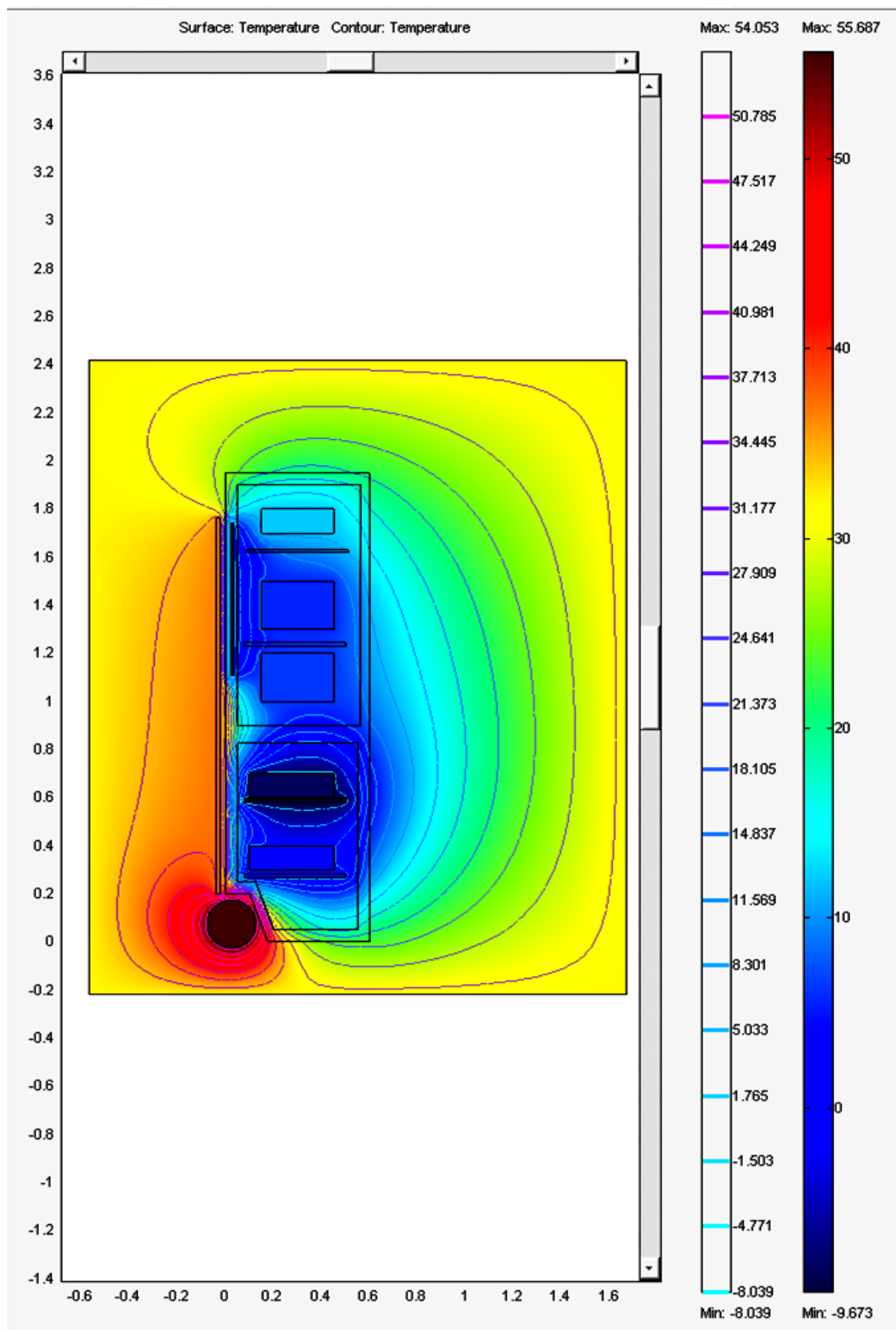


Рис.4.13. Дані розрахунку поля температур у завантаженому холодильнику з еквіпотенціальними лініями температури

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

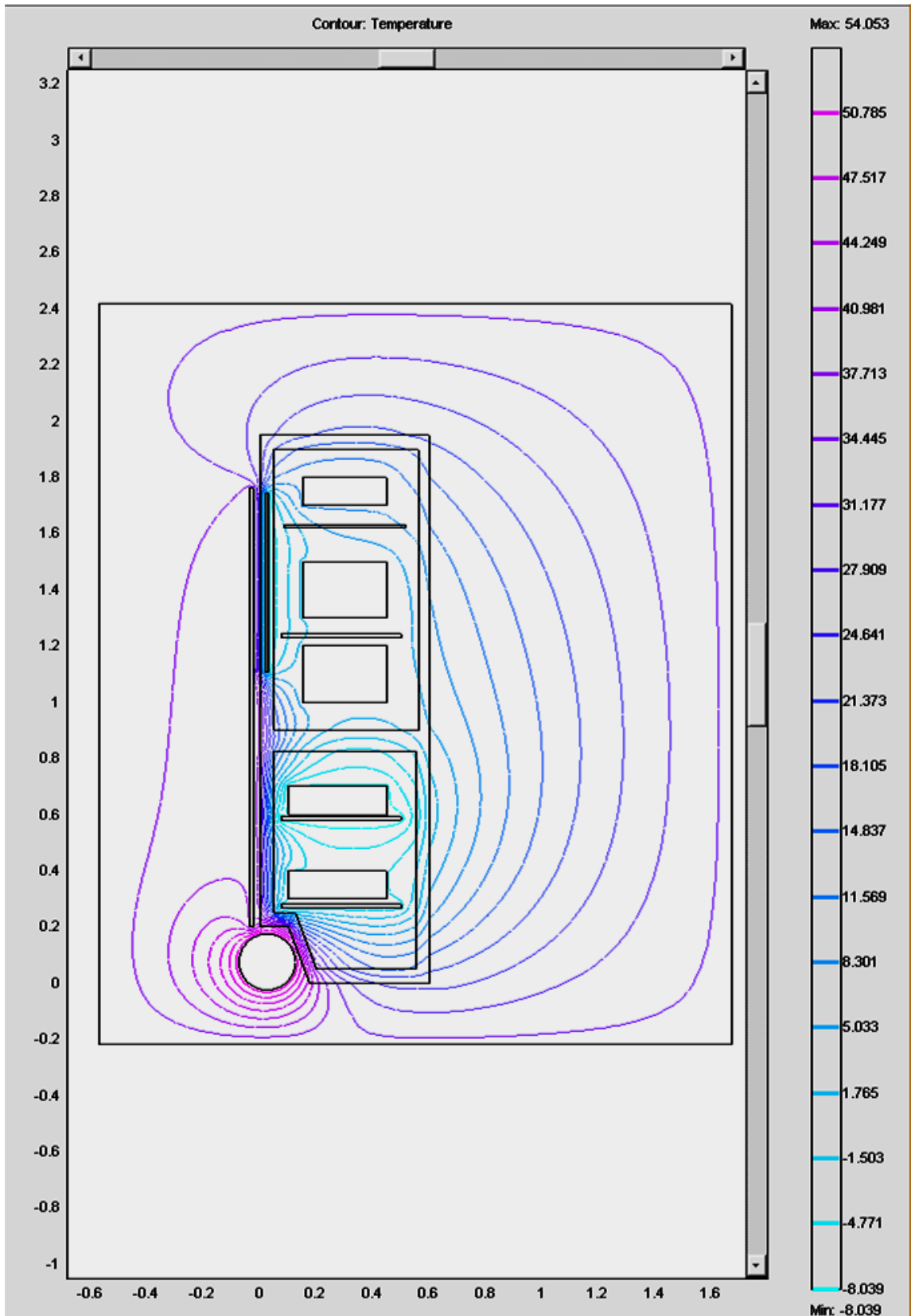


Рис.4.14. Дані розрахунку поля температур у завантаженому холодильнику з екіпотенціальними лініями температури

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

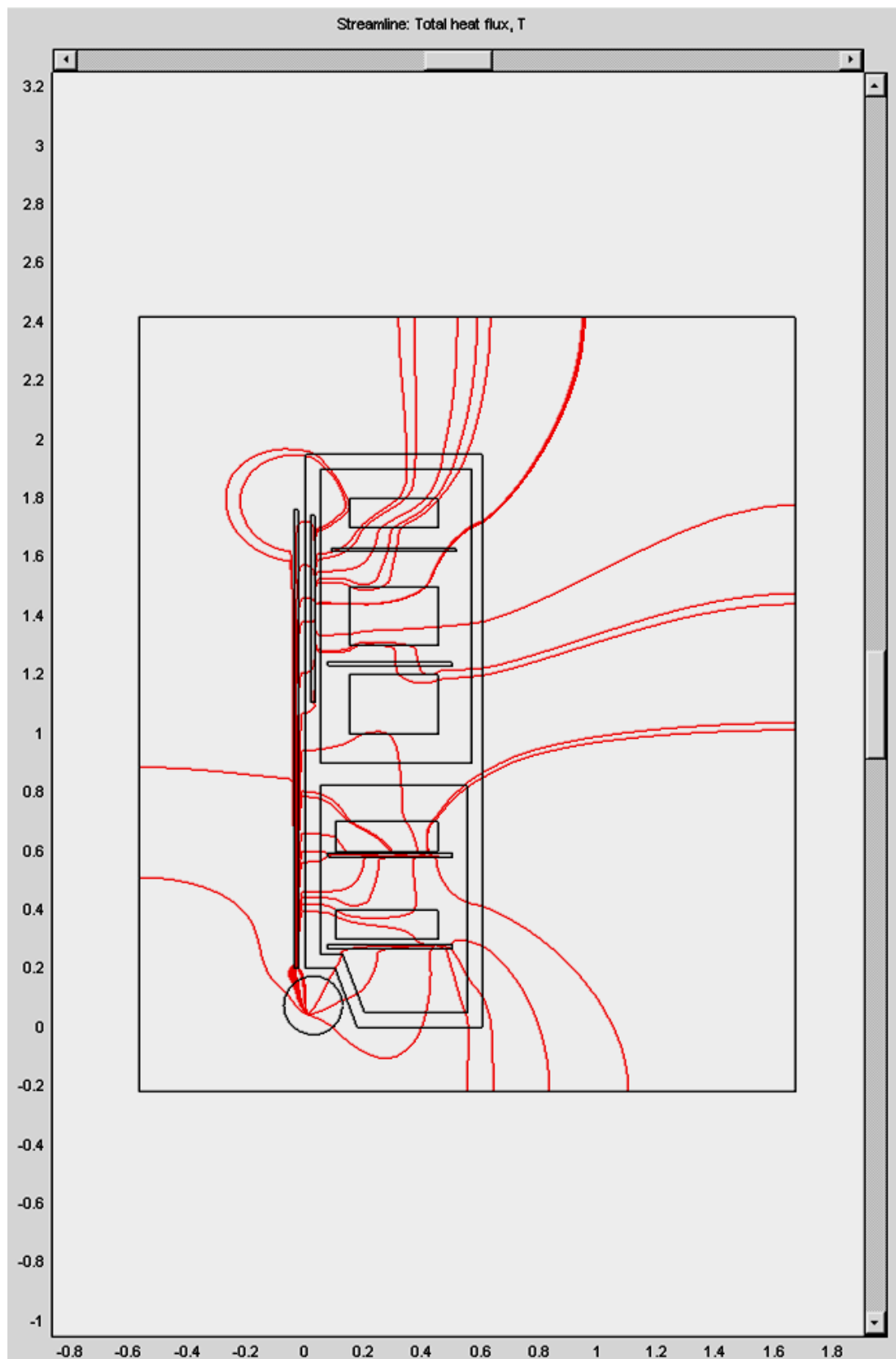


Рис.4.15. Лінії напрямків припливу тепла до випарників
завантажених холодильних шаф ззовні у приміщенні та від
конденсатора і мотор компресорного агрегату

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

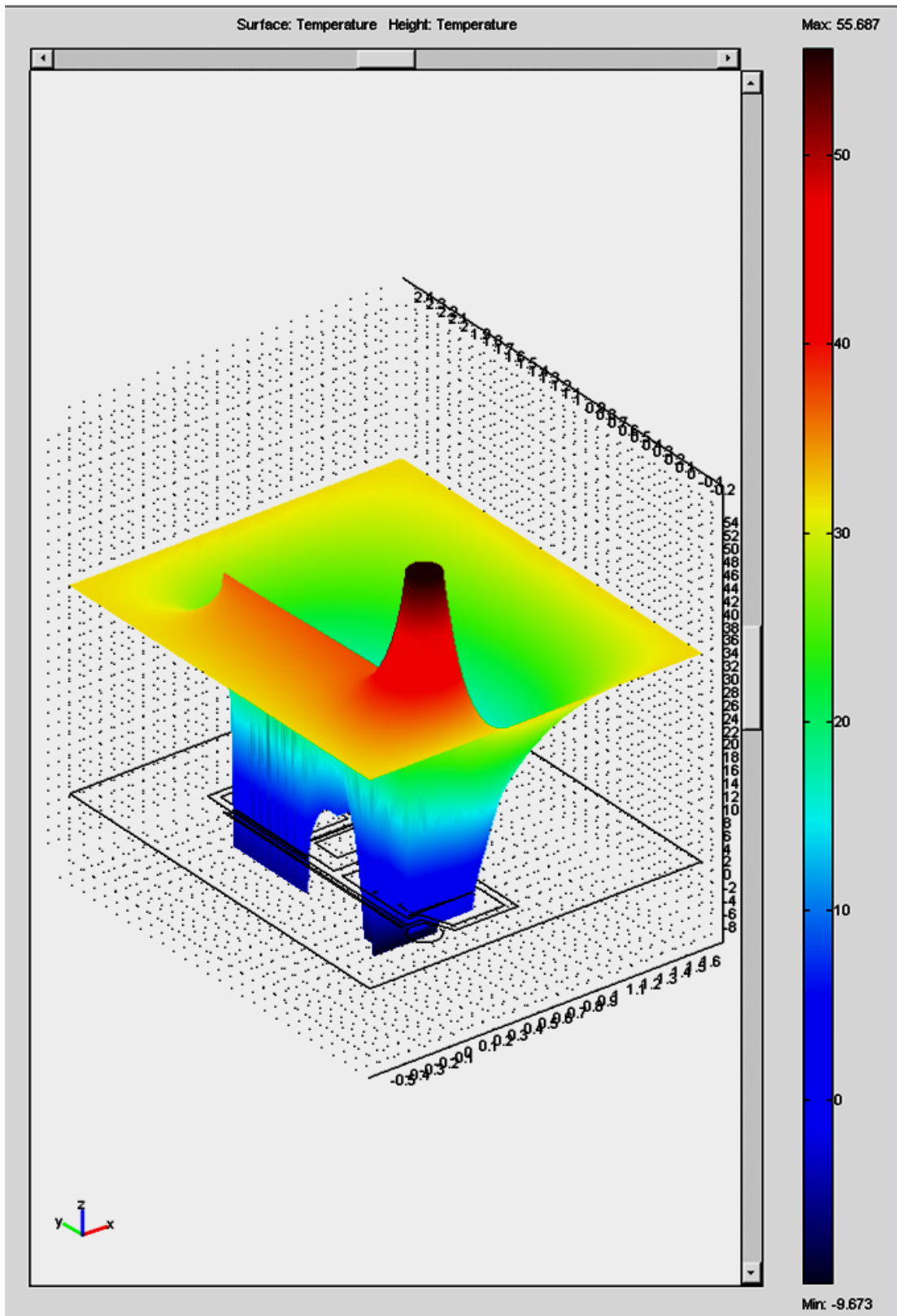


Рис.4.16. Поверхня градієнту температур і її шкала - праворуч у завантаженому холодильнику

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ЕН-141а 1.12

Лист

619

крайових умов, якими встановлюються початкові значення об'ємної густини щільності теплового потоку, межових температур на окремих ділянках або у оточуючому холодильнику середовищі. Загальний вигляд моделі побутового холодильника з об'єктами охолодження наведено на рис.4.9. У якості аналога об'єктів охолодження обрано силікон з його теплофізичними властивостями. пакети силікону у вигляді прямокутників покладені на полиці як у морозильній шафі так і у холодильній шафі. При розрахунку поля температур холодильника при повному завантаженні враховано приплив теплоти всередині шаф від покладених пакетів з силіконом.

На рис.4.11 наведено результати розрахунку поля температур у просторі в якому знаходиться побутовий холодильник завантажений об'єктами охолодження. Цей розрахунок потрібен для встановлення відповідної продуктивності холодильника із завантаженням продуктових шаф і дотримання його відповідним вимогам ДСТУ як холодильника, а також для апробації задачі моделювання.

На рис.4.12а та рис.4.12б наведені графіки розподілу температури всередині завантаженого об'єктами охолодження побутового холодильника уздовж його висоти від пілоги до стелі та по діагоналі від мотор компресорного агрегату до верхнього кута дверці холодильної шафи. Отримані залежності температур свідчать про коректність постановки вирішуваної задачі, задання межових умов та початкових даних. Як видно з рис.4.12а найнижчу температур у на рівні -10°C має морозильна шафа та таку при якій у холодильній шафі підтримується середня температура $+5^{\circ}\text{C}$, що відповідає експлуатаційним характеристикам холодильної шафи холодильника. При цьому морозильна шафа не відповідає покладеним на неї вимогам. На рис.4.12б можна бачити порушення умов щодо створення рівномірного розподілу температури у шафі охолодження. Так температура верхнього кута сягає навіть 15°C , що вважається неприпустимим і слід застосовувати заходи щодо усунення такого стану.

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
						60
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином моделювання поля температур у холодильнику завантаженому об'єктами охолодження з однаковими теплофізичними даними та навколо нього у приміщенні, яке має температуру 32⁰С, можна вважати успішним, та таким яке доводить коректність побудови чисельної моделі з вирішенні задачі Лапласа - конвекції та тепло і масо переносу. Отримані дані щодо розрахунку поля температур можна застосовувати як відпрані (незалежні початкові умови) для подальшого вирішення задачі при умові розташування у шафах холодильника об'єктів охолодження та заморожування теплофізичні властивості яких суттєво відмінні.

Висновки

1. Реалізована у програмному середовищі Femlab 3.0 задача з розрахунку поля температур може бути застосована для встановлення початкових умов щодо розрахунку поля вектора швидкості у об'ємі шаф охолодження та морозильної побутового холодильника будь якого типу і, на їх підставі, поля швидкості, якщо буде застосовуватись система штучного теплообміну конвекцією повітря, наприклад "no frost" .

2. Наведено, що поле температур в корисному об'ємі шаф холодильника суттєво залежить від об'єму об'єктів охолодження та є дуже нерівномірним як вширшки так і по висоті., що є важливою інформацією при виготовленні енергетично ефективних холодильників з рівномірним розподілом температури у внутрішньому об'ємі холодильника.

3. Результати моделювання поля температури всередині шаф холодильника дозволяють більш ретельно підійти до вибору типу, потужності, ефективної продуктивності асинхронного електродвигуна приводу компресора та у залежності від типу та товщини шару застосованої теплоізоляції кожуха холодильника на окремих його ділянках.

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		62

5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

5.1. Класифікація приміщення по ступеню небезпеки враження електричним струмом

Всі приміщення діляться по ступеню небезпеки поразки електричним струмом на три класи: без підвищеної небезпеки, з підвищеною небезпекою, особливо небезпечні.

Приміщення з підвищеною небезпекою характеризуються наявністю однієї з наступних п'яти умов, що створюють підвищену небезпеку:

- вологості, коли відносна вологість повітря перевищує 75%; такі приміщення називають сирими;

- високої температури, коли температура повітря тривало (понад доби) перевищує +35 °С; такі приміщення називаються жаркими;

- струмопровідного пилу, коли за умов виробництва в приміщеннях виділяється струмопровідний технологічний пил, в такій кількості, що вона осідає на дротах, проникає всередину машин, апаратів і т.і.; такі приміщення називаються заповненими із струмопровідним пилом;

- струмопровідної підлоги – металевих, земляних, залізобетонних, цегляних і т. п.;

- можливості одночасного дотику людини до обладнань, що мають з'єднання із землею, металоконструкціями будівель, технологічними апаратами, механізмами і т. п., з одного боку, і до металевих корпусів електроустаткування – з іншої.

Приміщення, яке розглядається в проекті - є приміщенням з підвищеною небезпекою поразки електричним струмом.

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		63

5.2. Розрахунок заземлення із застосуванням програмного середовища

Розрахунок заземлення зводиться до визначення довжини горизонтального заземлювача (обв'язки) та кількості вертикальних заземлювачів (стрижнів) при наданих умовах.

Заземление

вертикальный заземлитель

3 длина вертикального заземлителя, м

30 диаметр вертикального заземлителя, мм

0,5 заглубление вертикального заземлителя, м

1 толщина верхнего слоя грунта, м

сезонный климатический коэффициент

климатические зоны

I II III IV

1,6

горизонтальный заземлитель

20 ширина (диаметр) соединительной полосы (прутка), мм

расположение заземлителей

по контуру в ряд

материал

полоса пруток

сезонный климатический коэффициент

климатические зоны

I II III IV

3,5

удельное сопротивление грунта, Ом*м

почва (чернозем и др.)

супесь влажная, мергель

суглинок полутвердый или лессовидный

100 верхний слой, Ом*м 200 нижний слой, Ом*м сброс

Нормируемое сопротивление заземляющего устройства, Ом

напряжение сети, В

220/127 380/220 660/380 4 КОПР

вид заземления

Рабочее заземление нулевой точки трансформатора(генератора)

Повторное заземление нулевого провода на вводе в объект

Повторное заземление нулевого провода

расчет

сброс все

помощь

выход

<http://vzrd2001.narod.ru/> Copyright © 2003 alek2001. All rights reserved alek2001@mail.ru

Рис.5.1. Рабочее вікно програмного продукту «ЗАЗЕМЛЕНИЕ»

На рис.5.1. наведено рамку «Вертикальний заземлювач» в яку заносять наступну інформацію:

- Довжину вертикального заземлювача (L), яка має бути не менше 1,5м;
- Діаметр вертикального заземлювача (d), який має бути не менше 12мм;

- Заглиблення вертикального заземлювача (t), яке повинне бути не більше ніж 0,8м;
- Товщина верхнього шару ґрунту (H), який визначається за місцем улаштування заземлення;
- Сезонний кліматичний коефіцієнт, який залежить від середньої температури влітку, взимку і від кількості опадів у регіоні;
- Тип ґрунту.

На рис.5.1 наведено рамку «Горизонтальний заземлювач» в яку заносять наступну інформацію:

- Ширина (діаметр) горизонтального заземлювача (b);
- Переріз з'єднуючої смуги повинен бути не менше 48мм² і товщиною не менше 4мм. Якщо застосовується пруток - то діаметром не менше 10мм, якщо кутова сталь - то із мінімальною товщиною стінки 4мм, якщо труба - то із товщиною стінки не менше 3,5мм;
- Розточування заземлювачів може здійснюватись або замкнено у контур, або у ряд. Зазвичай обирається контур;
- Матеріал для виготовлення обв'язки горизонтального заземлювача (смуга або прутки);
- Сезонний кліматичний коефіцієнт.

В програму закладено деякі основні довідкові дані. На початку обирається питомий опір верхнього шару ґрунту, потім - нижнього. Можливий ввід даних у ручну. Якщо питомий опір ґрунту більше 100 Омм допускається збільшення вказаних норм у 0,01 рази, але не більш десятикратне. В цьому випадку активізується кнопка «КОРР» і рамка «Нормований опір заземлювача», рис.5.2.

Результати розрахунку захисного заземлення наведені у контрольному протоколі, рис.5.3.

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Заземление

При эквивалентном сопротивлении грунта более $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ необходимо увеличить величину нормированного сопротивления заземления на $k_3 = \rho_{\text{экв}}/100$, но не менее 1 и более 10

нормированное сопротивление, $\text{Ом}\cdot\text{м}$

скорректированное сопротивление, $\text{Ом}\cdot\text{м}$

Рис.5.2. Рамка «Нормований опір заземлювача»

Исходные данные

длина вертикального заземлителя L , м = 3

диаметр вертикального заземлителя d , мм = 30

заглубление вертикального заземлителя t , м = 0,5

толщина верхнего слоя грунта H , м = 1

ширина(диаметр) горизонтального заземлителя b , мм = 20

сезонный климатический коэффициент-вертикальный заземлитель, $C_v = 1,6$

сезонный климатический коэффициент-горизонтальный заземлитель, $C_g = 3,5$

удельное сопротивление верхнего слоя грунта ρ_1 , $\text{Ом}\cdot\text{м} = 100$

удельное сопротивление нижнего слоя грунта ρ_2 , $\text{Ом}\cdot\text{м} = 200$

нормируемое значение заземления, R_n , Ом = 4

коэффициент использования заземлителей = 0,7

Расчет

эквивалентное удельное сопротивление, $\text{Ом}\cdot\text{м} = 192$

сопротивление вертикального заземлителя, Ом = 58,0132

сопротивление контура, Ом = 7,68

предварительное количество вертикальных заземлителей, шт = 7,5538

длина горизонтального заземлителя, м = 11,3307

сопротивление горизонтального заземлителя, Ом = 49,9414

сумарное сопротивление верт. и гор. заземлителей, Ом = 9,0757

расстояние между вертикальными заземлителями K , м = 1,5 · 3

расстояние от центра вертикального заземлителя до поверхности земли T , м = 2

количество вертикальных заземлителей, шт = 10

Рис.5.3. Контрольный протокол розрахунків захисного заземлення

Методика розрахунку заземлення.

1.Спротивлення одиночного вертикального заземлителя Ом

$$R_0 = [r_{\text{ЭКВ}} / 2\rho L][\ln(2L/d) + 0,5\ln(4T+L)/(4T-L)]$$

2.Эквивалентное удельное сопротивление грунта Ом·м

$$r_{\text{ЭКВ}} = Yr_1r_2L/[r_1(L-H+t)+r_2(H-t)]$$

Y - сезонный климатический коэффициент

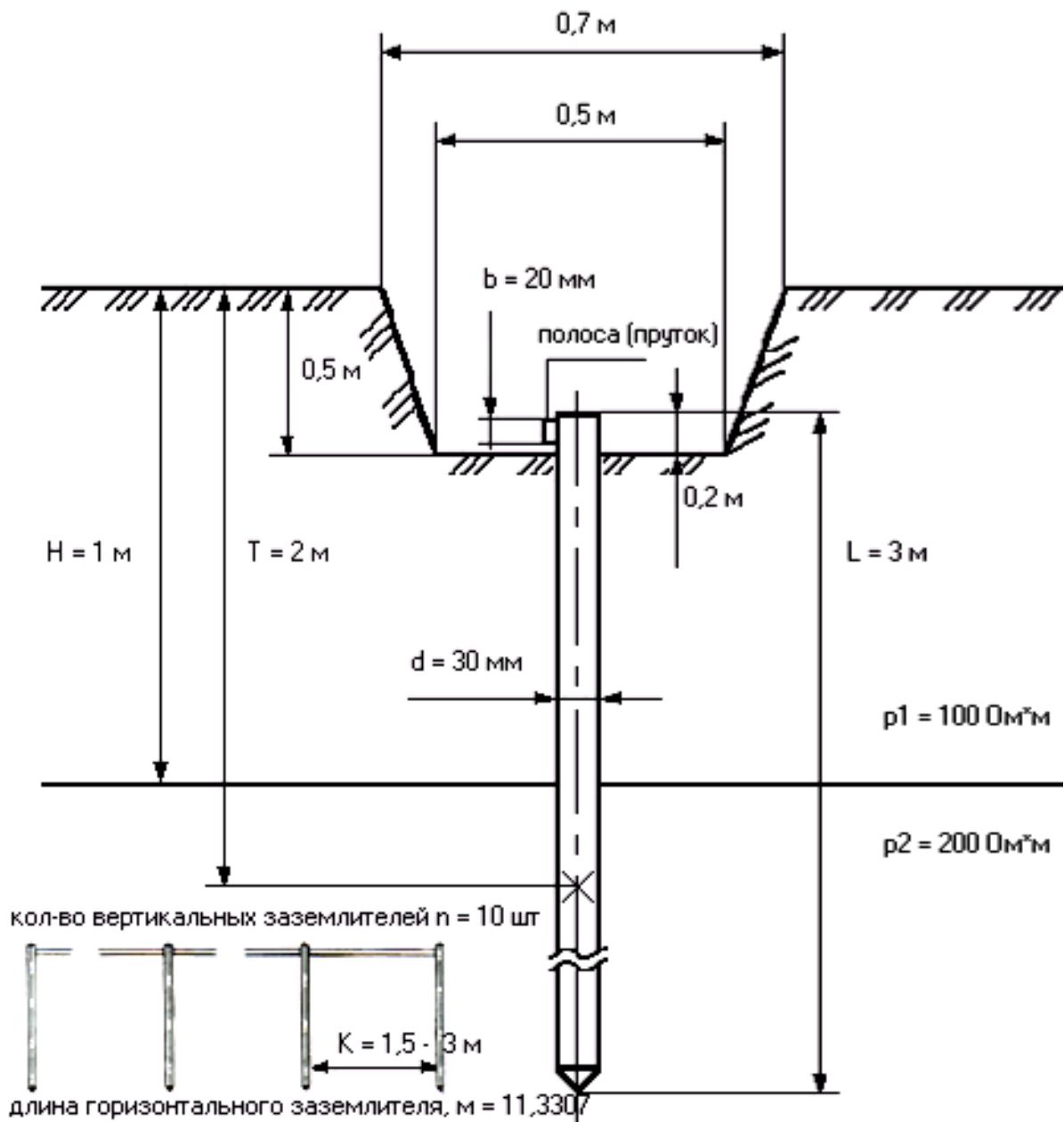


Рис.5.4. Ескіз захисного заземлення

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

3.Предварительное количество вертикальных заземлителей шт.

$$n_{\text{предв}} = R_0 Y / R_H$$

R_H –нормируемое сопротивление

4.Сопротивление тока растекания горизонтального заземлителя (полоса/пруток) Ом

$$R_{\Pi} = 0,366(r_{\text{экв}} Y / L_{\Pi} h_{\Pi}) \lg(2L_{\Pi}^2 / bt)$$

5. Длина горизонтального заземлителя (полоса/пруток) м

$$L_{\Pi} = L / 2(n_{\text{предв}} - 1) \quad \text{в ряд}$$
$$L_{\Pi} = L / 2n_{\text{предв}} \quad \text{контур}$$

6.Сопротивление вертикальных заземлителей с учетом горизонтальных заземлителей Ом

$$R_E = R_{\Pi} R_H / (R_{\Pi} - R_H)$$

7.Количество вертикальных заземлителей шт

$$n = R_0 / R_E h_c$$

Висновки

1. Результати розрахунку захисного заземлення виконані за прийнятою методикою у програмному середовищі «ЗАЗЕМЛЕНИЕ» наведені на рис.5.4.

2. Застосування програмного продукту значно спрощує процедуру розрахунків і забезпечує розробника повною інформацією щодо його улаштування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Вирішення задачі конвекції та тепло масо переносу є складним але важливим етапом при проектуванні побутових холодильників вищого класу енергоефективності і не визиває сумніву.

2. Вихідні дані щодо предмету дослідження і об'єкту є достатніми, для стаціонарного побутового холодильника типу КШД-260.

3. Недостатня технічна інформація якісні характеристики побутових холодильників у мережі Internet, яку пов'язують з корпоративними інтересами їх виробників, не дозволила провести багатоваріантний аналіз існуючих проектних рішень щодо обґрунтування обраного його зразка і, саме, його вихідних даних.

4. Розроблено математичну модель підсистеми комп'ютерного розрахунку задачі тепло масо обміну (Лапласа), в середині об'єму шаф - морозильної та холодильної промислових холодильників і у тому числі КШД-260, розрахунки якого дозволяють суттєво вплинути на точність отриманих результатів на рівні їх проектування. Така підсистема надасть можливість чисельного вивчення роботи побутового холодильника морозильника, чим скоротить час для прийняття рішення стосовно керування його продуктивністю під час застосування за місцем призначення.

5. Викладена в роботі математична модель рівняння Лапласа та така, яку закладено у програмному середовищі COMSOL Multiphysics в розділі Heat Transfer, дозволила виконати моделювання побутового холодильника за методом кінцевих елементів, здійснити розрахунки поля температур повітря, об'єктів охолодження як у морозильній шафі так і в холодильній та оточуючому повітрі приміщення. Розрахунки виконано для двох випадків - без завантаження і при завантаженні холодильника об'єктами охолодження. За даними розрахунків можна встановити ділянки оболонки побутового холодильника на яких поле температури не відповідає вимогам ДСТУ України щодо якості обладнання і тому вони вимагають штучного втручання

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		69

- переобладнанням шарів теплоізоляції або застосуванням покращеної теплоізоляції.

6. Апробований метод є корисним при вирішенні задачі флюїдної динаміки Нав'є-Стокса в якій розрахунок поля швидкості повітря примусової конвекції "no frost" залежить від температури повітря всередині холодильника.

ЛІТЕРАТУРА

1. Gresho, P.M, and Sani, R.L., Incompressible Flow and the Finite Element Method, Volume 1 & 2, John Wiley & Sons, New York, 2000.

2. Pironneau, O., Finite Element Methods for Fluids, John Wiley & Sons, 1989.

3. Rose, Alan, and Simpson, Ben: Laminar, Constant-Temperature Flow Over a Backward Facing Step, 1st NAFEMS Workbook of CFD Examples. Glasgow, UK, 2000.

4. Chen Deming. Retrospect and prospect of the international container shipping market, World Shipping, 2002(1): 1-5

5. Huang Zhen, Huang Jin, Shi Jinshan. Remote monitoring software design of refrigerated containers, China water transport, 2005(12):48-50

6. Zhang Jianfei, Fu Junlu. Development of maritime communication satellite and its application to ocean going ships, Radio communications technology, 2004(30), 46-49

7. Huang Zhujun. Immersed fleet system in ship-shore communication and its application Prospect, World shipping, 2004 (27): 47-48

8. Yue Xin. Immersed-F system theory and its application to security communication in the maritime distress, Proceedings of 2004 Academic Symposium of Professional Committee of communications and navigation of Chinese Institute of Navigation, 2004: 30-33

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		70

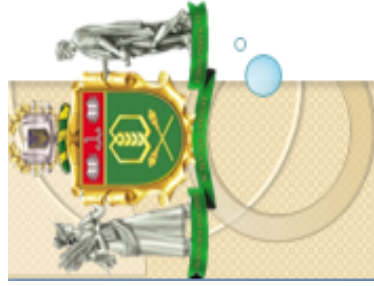
9. Houde Han, Dynamical simulation and energy-saving of cooling system for maritime air conditioning. spring Press 2002

10. Houde Han Dynamic Simulation Investigation of The Central Cooling System For Container Ships, International Congress of Refrigeration In USA2003.8

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		71

ДОДАТОК
Файли презентації

					ДП ЕН-141а 1.12	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		72

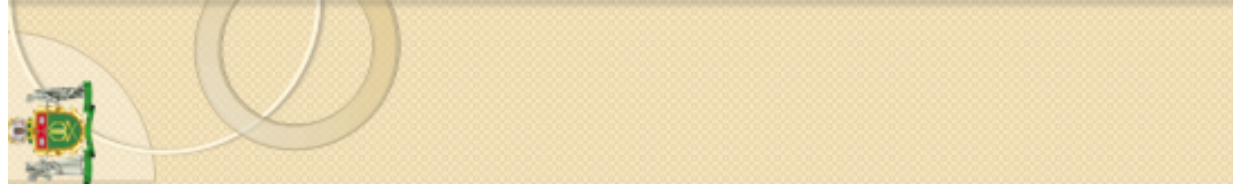


Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет
Кафедра холодильних установок і кондиціонування повітря

Презентація до кваліфікаційної роботи бакалавра
Здобувач Гуцуляк Іван Дмитрович
СВО бакалавр 4 курсу ЕН-141а групи

на тему:

Проект підсистеми комп'ютерного розрахунку поля температур у шафі побутового холодильника NORD-239



ВСТУП

Удосконалення енергетичної ефективності холодильної техніки, впровадження математичної моделі підсистеми комп'ютерного розрахунку задачі тепло масо пересування повітря в середині об'ємів шаф охолодження і морозильних камер холодильників, дозволяє суттєво вплинути на точність отриманих результатів під час їх проектування і надає можливість чисельного вивчення не тільки роботи холодильників, а і скоротити час щодо прийняття рішення стосовно керування його продуктивністю при застосуванні за місцем призначення, а відтак **є актуальним питанням**.

Галузь застосування - побутові холодильні установки і системи кондиціювання повітря.

Об'єкт дослідження - холодильна шафа і морозильна камера побутового холодильника морозильника КШД-260.

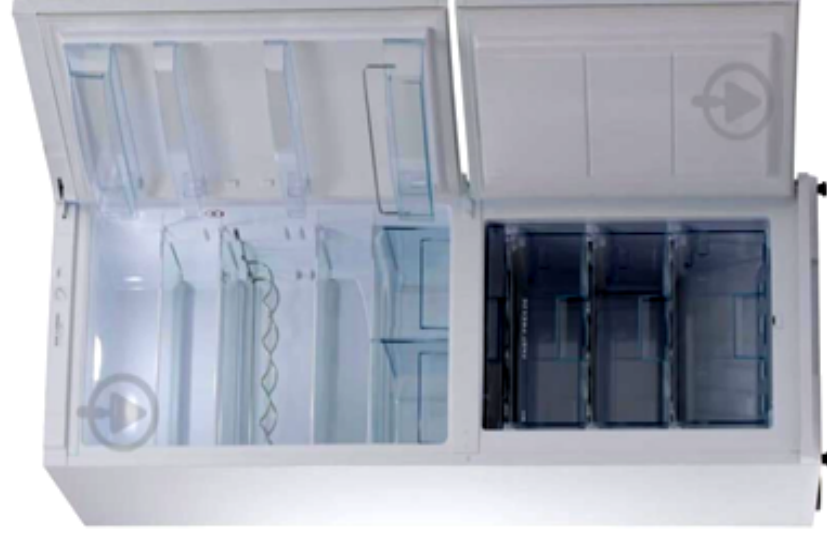
Предмет дослідження - побутовий холодильник морозильник типу NORD-239.

Мета роботи - виконати моделювання поля температур за методом кінцевих елементів шляхом вирішення рівняння Лапласа, яке закладено у програмному середовищі COMSOL Multiphysics в розділі Convection and Conduction, здійснити розрахунки поля температур повітря у стаціонарному режимі як на ділянці випарника так і в корисному об'ємі холодильної шафи без і при завантаженні шаф.



Вирішувані питання:

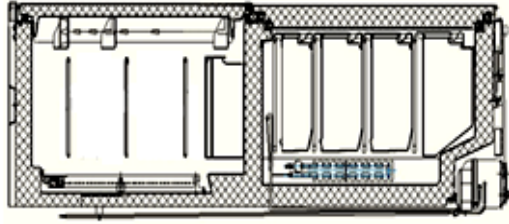
1. Дослідити сучасний рівень розробок і топології побутових компресійних холодильників морозильників (розділ 1)
2. Дослідити сучасну математичну модель розрахунку задачі конвекції і кондукції та обрати серед програмного забезпечення теплову модель, яка їй відповідає (розділи 2, 3)
3. Виконати чисельне моделювання поля температур у шафах холодильника та у оточуючому навколишньому середовищі для вивчення тепло припливів (розділ 4) у двох випадках – без завантаження і при завантаженні корисного об'єму шаф об'єктами охолодження



Холодильник морозильник
NORD-239



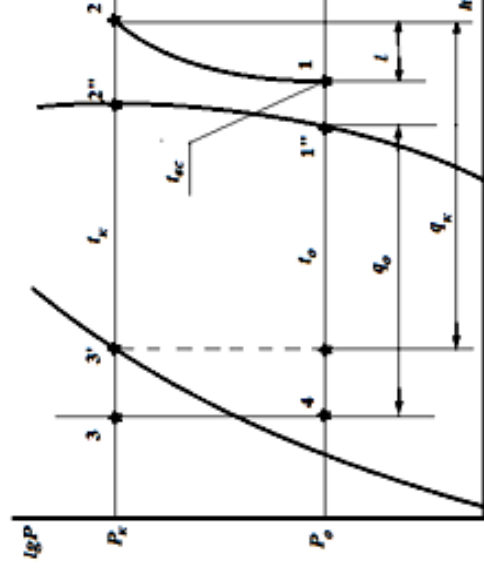
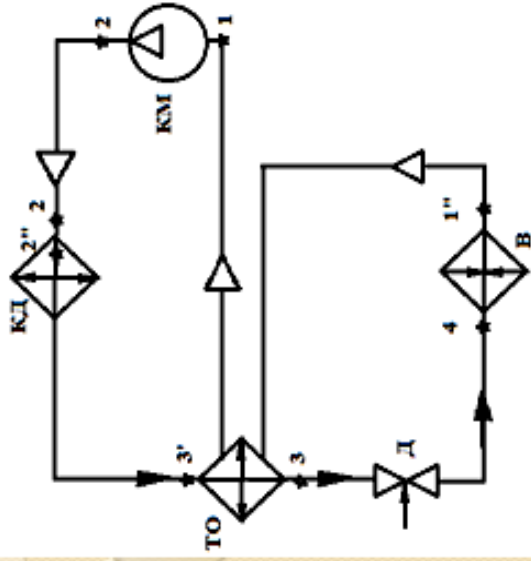
Предмет і об'єкт досліджень



Вихідні дані

Габаритні розміри:	
Товщина прошарку ізоляції стінки холодильної шафи	$\delta_{шк} = 45 \text{ мм}$
Товщина прошарку ізоляції стінки морозильної шафи	$\delta_{мк} = 68 \text{ мм}$
Довжина шаф холодильника	$a = 590 \text{ мм}$
Довжина холодильної шафи	$a_{шк} = a - 2\delta_{шк} = 590 - 2 \times 45 = 500 \text{ мм}$
Довжина морозильної шафи	$a_{мк} = a - 2\delta_{мк} = 590 - 2 \times 68 = 454 \text{ мм}$
Ширина холодильника	$b = 600 \text{ мм}$
Глибина холодильної шафи	$b_{шк} = 510 \text{ мм}$
Товщина дверці морозильної шафи	$b_{дв} = 50 \text{ мм}$
Ширина морозильної шафи	$b_{мк} = b - \delta_{мк} - b_{дв} = 600 - 68 - 50 = 482 \text{ мм}$
Висота холодильної шафи	$h_{шк} = (230 \cdot 10^6) / (500 \times 510) = 902 \text{ мм}$
Висота морозильної шафи	$h_{мк} = (120 \cdot 10^6 + 36,9 \cdot 10^6) / (454 + 482) = 717 \text{ мм}$
Об'єм відділення компресорного	$V_{холдп} = 250 \times 250 \times 590 = 36,9 \text{ дм}^3$
Висота морозильника	$H = h_{шк} + h_{мк} + 2 \times \delta_{шк} + \delta_{шк} = 902 + 549 + 2 \times 68 + 45 = 1800 \text{ мм}$
Застосовані хладони	R-134a, R-409a ($t_{співнах} = -29^\circ \text{ C}$)
Напрята живлення	220 В, однофазна, частота струму 50 Гц

Принципова схема та цикл компресійної холодильної машини



Принципову схему роботи холодильної машини наведено на рисунку. Пара хладону від кипіння хладону у випарнику, всмоктується компресором К.М. В ньому вона стискається (при цьому температура і тиск його збільшуються) і нагнітається через трубопровід до конденсатора К.Д. Там пар хладагенту охолоджується повітрям і конденсується у рідину. Рідина хладону по трубопроводу потрапляє до дроселю Д, в якому стрімко спадають її тиск і температура на вході у випарник В. У випарнику вона кипить, перетворюючись із рідини у пар, який всмоктує певну кількість теплоти від об'єкта охолодження. Далі пар хладону по всмоктуючому трубопроводу спрямовується до компресора, але після попереднього підігріву у регенеративному теплообміннику Т.О., утвореному капілярною трубкою яку ретельно приєднано до патрубку всмоктування. Переохолодження рідини сприяє збільшенню холодної продуктивності, а перегрів пари у всмоктуючому трубопроводі зменшує об'ємні втрати та збільшує холодину продуктивність компресора. Окрім того, при наявності теплообмінника припускається деяке переповнення випарника хладоном без небезпеки гідрвлічного удару та покращує повертання масла з випарника до компресора.



Дослідження сучасної математичної моделі розрахунку задачі конвекції і кондукції

Положення загальної термодинаміки стверджують, що ентальпія одиниці маси речовини визначається потужністю

$$h = u_{\text{шт.}} + p/\rho$$

і рівняння переносу ентальпії матиме вигляд

$$\frac{d(\rho h)}{dt} + \nabla \cdot (\rho h \bar{v}) = -\nabla \cdot \bar{q} + \frac{\partial p}{\partial t} + p(\nabla \cdot \bar{v}) - \bar{\gamma} : (\nabla \cdot \bar{v})$$

Оскільки теплообмін здійснюється при ізобарній течії речовини, $p = \text{idem}$ рівняння спрощується до виду:

$$\frac{dh}{dt} + \nabla \cdot (h \bar{v}) = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \bar{q} - \frac{1}{\rho} \bar{\gamma} : (\nabla \cdot \bar{v})$$

Застосовуючи заміну змінних $dh = c_p d\theta$ $\bar{q} = -\lambda d\theta$

де ізобарну теплоємність одиниці маси речовини і її теплопровідність c_p та λ вважаємо незмінними, матимемо рівняння переносу енергії у динаміці виду:

$$c_p \frac{d\theta}{dt} + \nabla \cdot (c_p \theta \bar{v}) = \frac{\lambda}{\rho} \nabla^2 \theta - \frac{\bar{\gamma}}{\rho} : (\nabla \cdot \bar{v})$$

або для сталого режиму при якому часткова похідна є нульовою

$$\nabla \cdot (\theta \bar{v}) = \frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla^2 \theta - \frac{\bar{\gamma}}{\rho c_p} : (\nabla \cdot \bar{v}),$$

Останнє рівняння співпадає з його аналогом, наведеним у програмному продукті COMSOL Multiphysics Femlab 3.0, а саме його частині Heat Transfer – Convection and Conduction, яку і застосовано у роботі для розрахунку задач теплообміну конвекцією.



Чисельне моделювання поля температур у шафах холодильника та у оточуючому навколишньому середовищі для вивчення тепло припливів

Для вирішення диференціальних рівнянь у приватних похідних PDE, COMSOL Multiphysics використовує метод кінцевих елементів (FEM). Програмне забезпечення запускає кінцевоелементний аналіз разом з побудовою сітки, яка враховує конфігурацію тіл і контролює похибку з використанням різноманітних чисельних вирішувачів. Так як більшість фізичних законів може бути наданою у вигляді PDE, стає можливим моделювати широкий спектр наукових і інженерних явищ з багатьох галузей фізики і, у тому числі, явища конвекції і теплопередачі.

Для побудови і розрахунку задачі конвекції та теплопередачі у програмному забезпеченні застосовується наступна послідовність дій.

1. Обирається розмірність моделі (2D), визначається фізичний розділ в **Model Navigator [Навігатор моделей]** (кожному розділу відповідає певне диференціальне рівняння) та встановлюється стаціонарний або нестаціонарний аналіз поля температури повітря.
2. Визначається робоча область і задається її геометрія на робочому столі.
3. Задаються вихідні дані, залежності змінних від координат.
4. Вказуються фізичні властивості (в'язкість, питому вагу тощо) і початкові умови вільних складових у диференційному рівнянні теплообміну.
5. Вказуються межові умови.
6. Задаються параметри об'єкта і будується сітка.
7. Встановлюються параметри пристрою вирішувача та запускається розрахунок.
8. Налагоджується режим відображення розрахунку і візуалізація результатів.



ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР У ШАФАХ ХОЛОДИЛЬНИКА ВИХІДНІ ДАНІ

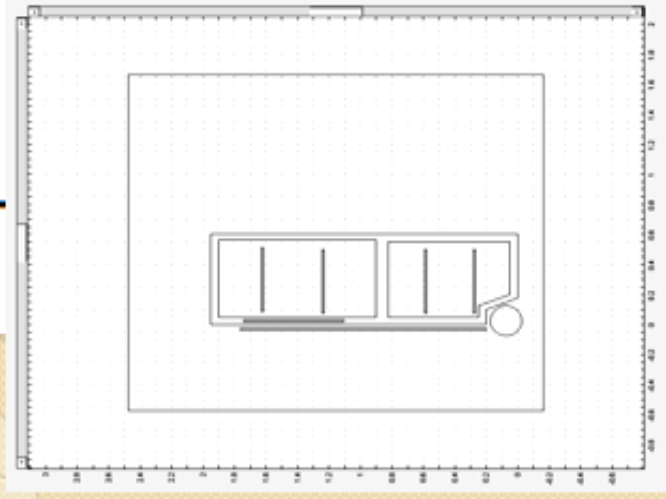
Слайд 6

1. Основний випарник з температурою випаровування хладону -28°C розташовано у вигляді двох полиць морозильної шафи. Інший випарник, як продовження основного розташовано всередині запіненою теплоізоляцією видаленої стінки холодильника.
2. Кількість теплоти, яку віддає конденсатор у оточуюче середовище без завантаження шаф об'єктом охолодження (холостий хід). $Q_1 = 179 \text{ Вт} \cdot \text{год}$
3. Кількість теплоти, яку привносить втрати потужності у двигуні герметичного компресора $Q_3 = 93 \dots 150 \text{ Вт} \cdot \text{год}$
4. Кількість теплоти, яка проникає у шафи холодильника через теплоізоляцію з пінополіуретану $Q_2 = 59 \text{ Вт} \cdot \text{год}$
5. Кількість теплоти, яка потрапляє до шаф холодильної та морозильної від об'єкта охолодження $Q_0 = 28 \text{ Вт} \cdot \text{год}$
6. Температура оточуючого середовища 32°C
7. Уставка терморегулятора винна відповідати температурі -18°C до -24°C у морозильній камері
8. При розрахунку температури в статичі припускаємо, що на початку теплова провідність повітря є незмінною і становить $k = 0,028 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$
9. Густина повітря $\rho = 1 \text{ кг}/\text{м}^3$
10. Питома теплоємність повітря $c_p = 980 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$
11. На початку об'ємна густина щільності теплового потоку $Q_0 = 0 \text{ Вт}/\text{м}^3$.

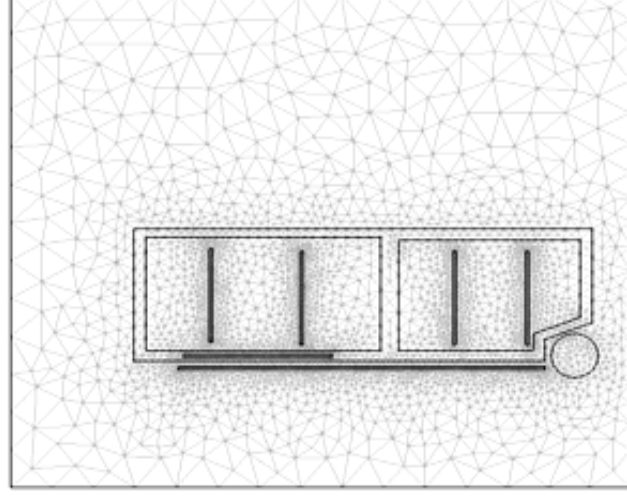


Дані 2D моделювання топології побутового холодильника у режимі холостого ходу - без об'єктів охолодження

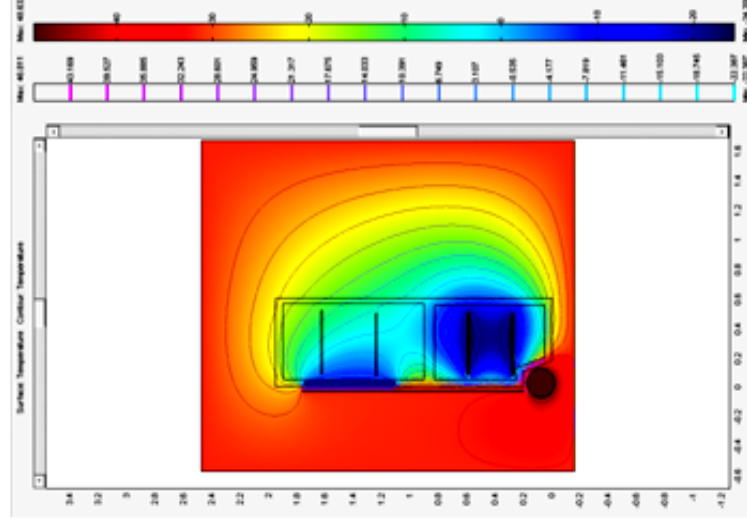
Слайд 7



Загальний вигляд області розрахунку побутового холодильника



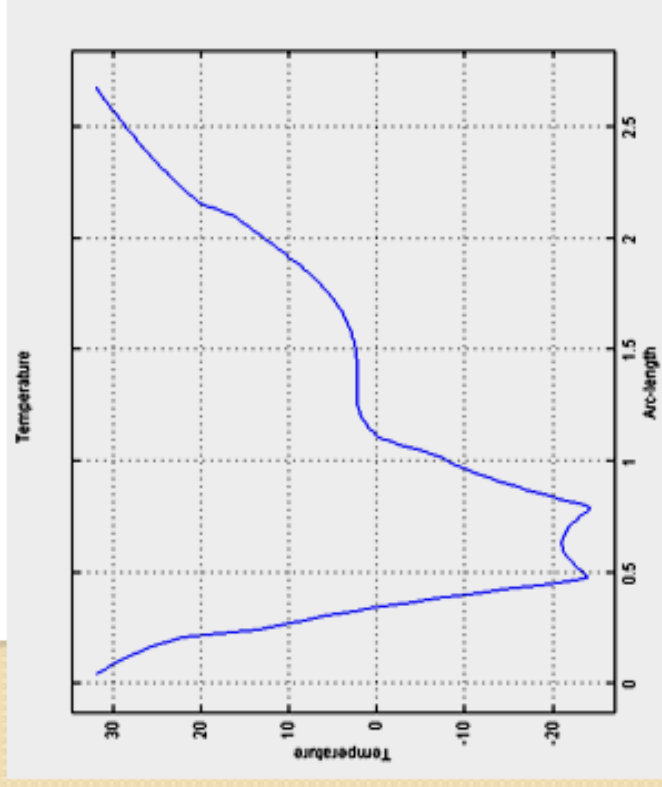
Загальний вигляд геометрії області розрахунку побутового холодильника поділеної на елементарні трикутники (триангуляція)



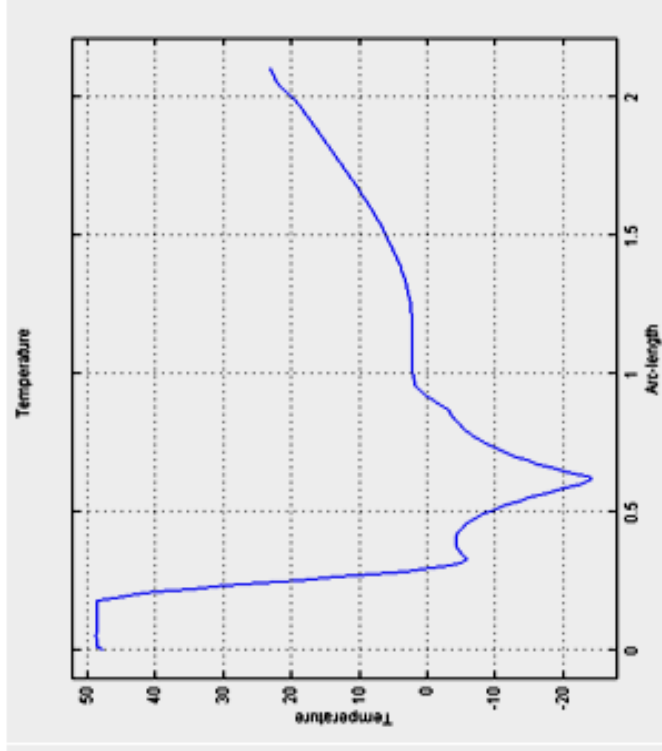
Дані розрахунку поля температур у порожньому холодильнику



Дані 2D моделювання температури побутового холодильника у режимі холостого ходу - без об'єктів охолодження

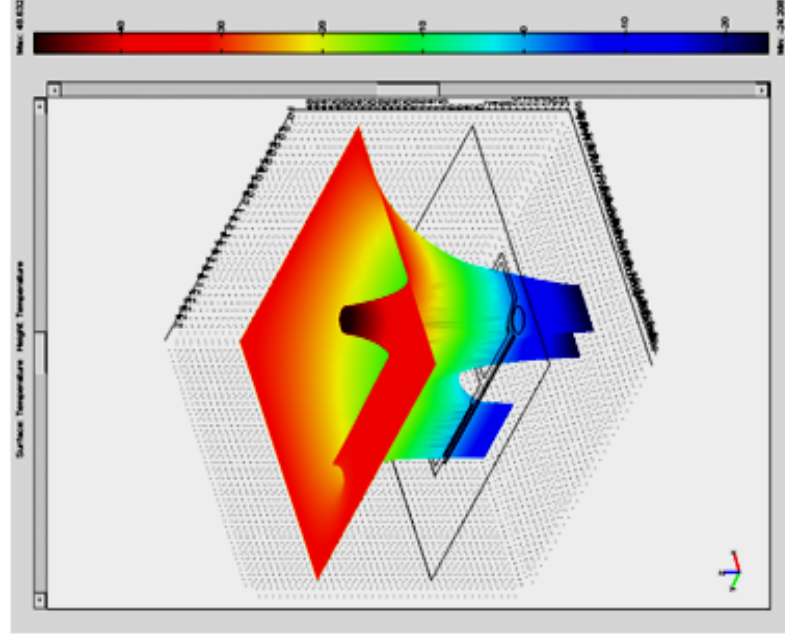


Розподіл поля температур у порожньому
холодильнику по висоті від підлоги до
ступі уздовж висоти холодильника
в середині об'єму шаф

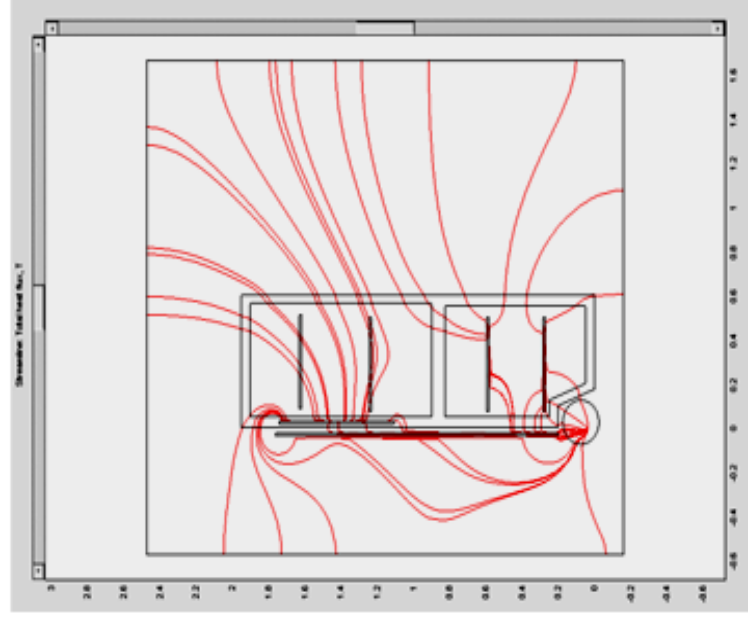


Розподіл поля температури у
порожньому холодильнику по
діагоналі від низу компресора до
правого верхнього кута

**Дані 2D моделювання градієнту температури та припливів
тепла до поверхні побутового холодильника у режимі холодового ходу
- без об'єктів охолодження**



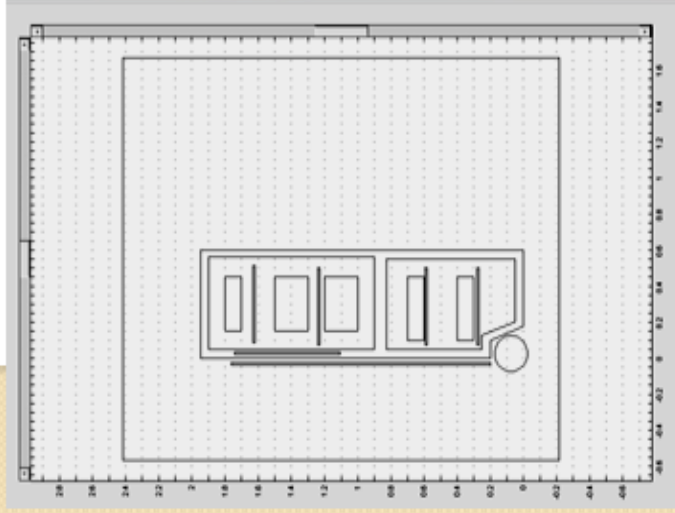
Поверхня градієнту температур і її
шкала - праворуч у порожньому
холодильнику



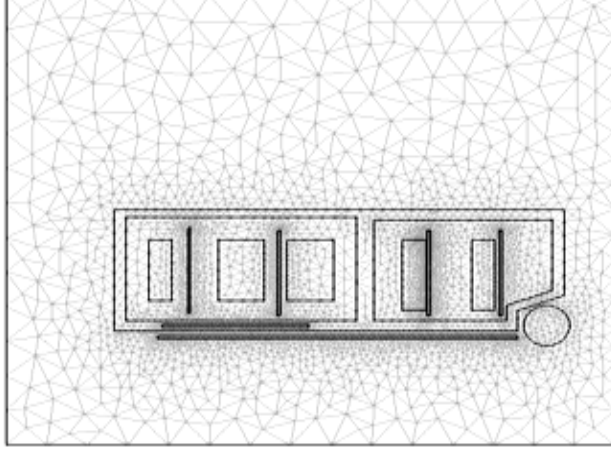
Лінії напрямків припливу тепла
до випарників холодильних
шаф ззовні у приміщенні та від
конденсатора і мотор
компресорного агрегату

Дані 2D моделювання топології побутового холодильника з об'єктами охолодження

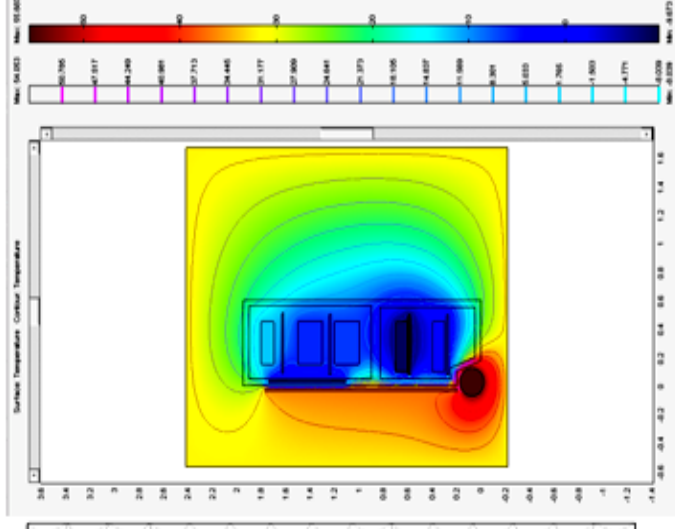
Слайд 10



Геометрії області розрахунку побутового холодильника з об'єктами охолодження (пакетами силікону)

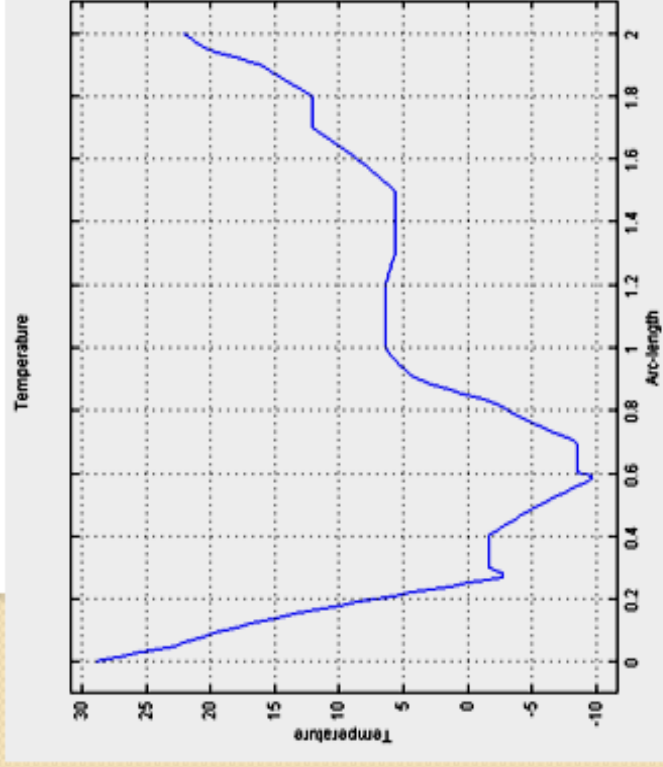


Загальний вигляд геометрії області розрахунку побутового холодильника після триангуляції із завантаженням шаф охолодження прямокутниками з силікону

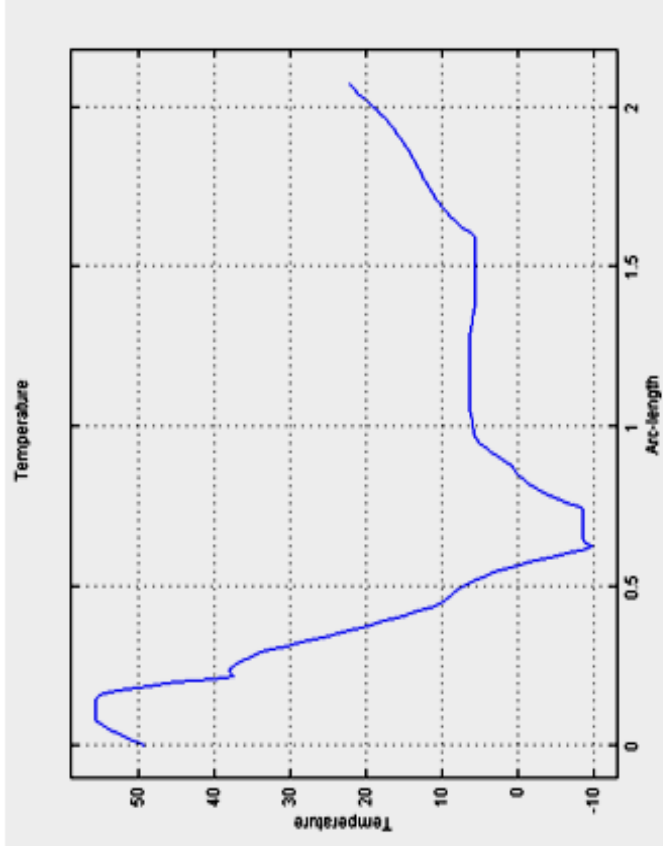


Дані розрахунку поля температур у завантаженому холодильнику з еквівалентними лініями температури

Дані 2D моделювання температури побутового ХОЛОДИЛЬНИКА з об'єктами ОХОЛОДЖЕННЯ



Розподіл поля температур у
завантаженому холодильнику по
висоті від підлоги до стелі уздовж
висоти холодильника всередині
об'єму шаф



Розподіл поля температур у
завантаженому холодильнику по
діагоналі від низу компресора до
правого верхнього кута шафи



ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Слайд 12

1. Вихідні дані щодо моделювання задачі конвекції виявилися достатніми, для вивчення стаціонарного режиму роботи побутового холодильника типу КШД-260.
2. Застосована математична модель, як підсистема комп'ютерного розрахунку задачі тепло масо обміну, в середині об'єму шаф холодильника КШД-260, надає дані розрахунків, які можуть бути корисними при проектуванні або дослідженнях, бо здатна скоротити час для прийняття рішення стосовно удосконалення його продуктивності.
3. Розрахунки виконані для двох випадків - без завантаження і при завантаженні холодильника об'єктами охолодження дозволили встановити ділянки оболонки побутового холодильника на яких поле температури не відповідає вимогам ДСТУ України щодо якості обладнання і тому вони вимагають переобладнання шарів теплоізоляції або застосування покращеної теплоізоляції.
4. Апробований метод є необхідним при вирішенні задачі флюїдної динаміки Нав'є-Стокса, в якій розрахунок поля швидкості повітря примусовою конвекцією "по frost" залежить від температури повітря всередині холодильника.

Дякую за увагу