

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



ПОЯСНОВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

на тему Проект підсистеми комп'ютерного розрахунку примусового руху повітря у рефрижераторному контейнері
(назва кваліфікаційної роботи згідно з наказом ЗВО)

Здобувач Єрмолаєв С. Д.
(прізвище, ініціали)
СВО Бакалавр IV курсу ЕНск-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

Єрмолаєв Сергій Дмитрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проект підсистеми комп'ютерного розрахунку примусового руху повітря у рефрижераторному контейнері _____
затверджена наказом ЗВО від 31.08.2023 року № 487-03
2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 30.05.2024 року
3. Вихідні дані роботи Стационарний рефрижераторний контейнер TEU-20 з розмірами 6x2,5x2,6 м³ на 22 тони вантажу і працюючий на хладону R-134a, R-409a (t_{кипіння} = -29° C)
Перелік питань, які потрібно розробити 1. Виконати огляд сучасного стану розвитку галузі рефрижераторних контейнерів 2. Викласти алгоритм математичної моделі щодо вирішення задачі флюїдної динаміки. 3. Виконати моделювання поля швидкості руху повітря на ділянці випарника контейнера. 4. Виконати спільне моделювання примусової швидкості повітря в корисному об'ємі рефрижераторного контейнера
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Презентація PowerPoint:
 1. Об'єкт дослідження та мета роботи (1 аркуш)
 2. Вирішувані питання, предмет і об'єкт дослідження, Вихідні дані (2 аркуш).
 3. Узагальнена схема холодильної установки рефрижераторного контейнера і умови роботи (1 аркуші).
 4. Постановка задачі моделювання задачі гідродинаміки Навьс-Стокса(1 аркуш).
 5. Застосування ПЕОМ для вирішення задачі гідро газодинаміки(1 аркуш).
 6. Розрахункова модель холодильного рефрижераторного контейнера без завантаження і поле швидкості повітря (1 аркуш)
 7. Розрахункова модель холодильного рефрижераторного контейнера із завантаженням і поле швидкості повітря (1 аркуш)
 8. Висновки по роботі (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 галузі рефрижераторних контейнерів	1.01.24р - 14.01.24р	виконано
2.	Термодинамічна модель рефрижераторного контейнера та її математична модель	15.01.24р - 7.03.24р	виконано
3.	Моделювання задачі гідродинаміки на ПЕОМ	8.03.24р - 7.04.24р	виконано
4.	Чисельне моделювання швидкості руху повітря у відсіку випарника	8.04.24р - 7.05.24р	виконано
5.	Розрахунок швидкості повітря в холодильній камері рефрижераторного контейнера	8.05.24р - 18.05.24р	виконано
6.	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

Єрмолаєв Сергій Дмитрович

РЕФЕРАТ

Звіт про КР: 75 стор., 2 табл., 34 рис., 23 джерела

Розробка математичної моделі підсистеми комп'ютерного розрахунку задачі гідродинаміки (Нав'є-Стокса), в середині об'єму камер і випарників промислових холодильників і у тому числі рефрижераторних контейнерів, дозволяє суттєво вплинути на точність отриманих результатів під час проектування. Така підсистема забезпечить можливість чисельного вивчення роботи холодильника, чим скоротить час для прийняття рішення стосовно керування його продуктивністю під час застосування за місцем призначення.

В роботі, на підставі ретельного вивчення і аналізу сучасних рефрижераторних контейнерів, на прикладі їх різновидів від провідних сучасних виробників, за предмет дослідження обрано модель стаціонарного рефрижераторного контейнера TEU-20.

Викладена в роботі математична модель рівняння Нав'є-Стокса та така, яку закладено у програмному середовищі COMSOL Multiphysics в розділі Fluid Dynamics, дозволила виконати моделювання рефрижераторного контейнера за методом кінцевих елементів, здійснити розрахунки поля швидкості примусового руху повітря як на ділянці випарника так і в корисному об'ємі холодильної камери та по штучних каналах в підлозі. Розрахунки виконано для двох випадків - без завантаження і при завантаженні камери. За даними розрахунків можна встановити ділянки камери де рух повітря уповільнений і тому вони вимагають штучного підсилення - переобладнанням повітряних каналів під підлогою.

Апробований метод є корисним при вирішенні задачі конвекції і теплопровідності Лапласа в якій розрахунок поля температури залежить від швидкості примусового руху повітря.

Галузь застосування - транспортні холодильні установки

ABSTRACT

News about QR: 75 pages, 2 tables, 34 pictures, 23 images

The development of a mathematical model of the subsystem of the computer calculation of the problem of hydrodynamics (Navier-Stokes), in the middle of the volume of chambers and evaporators of industrial refrigerators, including refrigerated containers, allows to significantly influence the accuracy of the results obtained during design. Such a subsystem will provide the possibility of numerical study of the operation of the refrigerator, which will reduce the time to make a decision regarding the management of its performance during application at the destination.

In the work, on the basis of a thorough study and analysis of modern refrigerated containers, on the example of their varieties from leading modern manufacturers, the TEU-20 stationary refrigerated container model was chosen as the subject of research.

The mathematical model of the Navier-Stokes equation presented in the work and the one embedded in the COMSOL Multiphysics software environment in the Fluid Dynamics section allowed to perform simulation of the refrigerated container using the finite element method, to perform calculations of the velocity field of forced air movement both in the area of the evaporator and in the useful volume in the refrigerating chamber and through artificial channels in the floor. Calculations were made for two cases - without loading and when loading the camera. According to the calculations, it is possible to establish areas of the chamber where the air movement is slowed down and therefore they require artificial reinforcement - by refitting the air ducts under the floor.

The tested method is useful in solving the problem of Laplace convection and heat conduction, in which the calculation of the temperature field depends on the speed of forced air movement.

Field of application - transport refrigeration units

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТЕМИ.....	8
1. ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ГАЛУЗІ РЕФРИЖЕРАТОРНИХ КОНТЕЙНЕРІВ І АНАЛІЗ РОБОТИ ЇХ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ.....	12
1.1. Класифікація рефрижераторних контейнерів.....	12
1.2. Загальний устрій і особливості роботи РК провідних виробників.....	15
1.2.1. Особливості устрою холодильної установки.....	18
1.2.2. Робота холодильної машини рефрижераторного контейнера.....	22
1.3. Основні параметри діаграми циклу роботи компресійної ХМ.....	28
1.4. Напрямки розвитку параметричного ряду РК.....	32
2. ТЕРМОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ РЕФРИЖЕРАТОРНОГО КОНТЕЙНЕРА.....	34
2.1. Моделювання швидкості руху повітря у відсіку випарника холодильної установки.....	34
2.1.1. Постановка задачі моделювання.....	36
3. ЗАСТОСУВАННЯ ПЕОМ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ГІДРО ГАЗОДИНАМІКИ.....	42
3.1. Робота в COMSOL Multiphysics.....	44
3.1.1. Навігатор моделей і головне меню.....	44
3.1.2. Головне меню.....	45
3.1.3. Робоча область і завдання геометрії.....	46
3.1.4. Завдання фізичних властивостей об'єктів і початкових умов.....	47
3.1.5. Завдання межових умов і зміна диференціальних рівнянь.....	49
3.1.6. Побудова сітки.....	49
3.1.7. Обрання вирішуючого пристрою.....	50
3.1.8. Візуалізація результатів розрахунку.....	51
4. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ	

ПОВІТРЯ У ВІДСІКУ ВМПАРНИКА.....	52
4.1. Моделювання пристрою випарника.....	53
4.2. Результати розрахунку швидкості повітря у відсіку випарника.....	55
Висновки до розділу 4.....	58
5. РОЗРАХУНОК ШВИДКОСТІ ПОВІТРЯ В ХОЛОДИЛЬНІЙ КАМЕРІ РЕФРИЖЕРАТОРНОГО КОНТЕЙНЕРА.....	60
Висновки до розділу 5.....	65
6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	66
6.1. Класифікація приміщення по ступеню небезпеки враження електричним струмом.....	66
6.2. Розрахунок заземлення із застосуванням програмного середовища.....	67
Висновки до розділу 6.....	71
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	72
ЛІТЕРАТУРА.....	73
ДОДАТОК Файли презентації.....	76

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 під час транспортування. Об'єми харчових продуктів, які належать транспортуванню, визначаються попитом споживчого ринку. Швидкопсувні продукти (ШПП) потрапляють до місця призначення усіма засобами транспортування і, у тому числі, морем, автомобільним та залізничним транспортом. Оскільки транспортування ШПП здійснюється упродовж тривалого часу, із урахуванням його розмитнення, та при умові можливих коливань температури оточуючого середовища в межах майже $\pm 50^{\circ}\text{C}$, суттєвого значення отримують технічні засоби які забезпечують їх зберігання упродовж транспортування – рефрижераторні контейнери (РК).

Бажання вантажовідправників прискорити оборотність коштів та зменшити витрати по доставці ШПП споживачам, а також працювати без проміжного його зберігання призводить до зниження ваги вантажу і збільшенню частоти його перевезень у обсягах від 5 до 20 тон. Таким чином фінансова стійкість постачальницьких підприємств залежить від наявності спеціалізованих технічних засобів для перевезень ШПП і наявності розвиненої інфраструктури їх обслуговування. З іншого боку, відповідно до принципу транспортної логістики - «необхідний товар вищої якості з мінімальними витратами», виникає потреба у подальшій розробці, удосконаленні РК, ефективних технологій їх перевезення та обладнання щодо підтримання їх у робочому стані на контейнерних майданчиках і терміналах. Окремого значення отримують питання розробки сучасних технічних приладів щодо моніторингу робочих характеристик холодильної

					КРБ.ХУКП.1.487-03.2.23			
Ізм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Єрмолаєв			Проект підсистеми комп'ютерного розрахунку примусового руху повітря у рефрижераторному контейнері	Лит.	Лист	Листів
Перевір.		Байдак					4	78
Реценз.						ОНТУ гр. ЕН-141		
Контр.								
Затверд.								

машини (ХМ), шафи охолодження (ШО), а саме: температур, тиску, вологості, енергоспоживання, компактного зберігання масивів отриманих у часі даних моніторингу, визначення технічного стану зносу обладнання ХМ або енергетичної ефективності мотор компресорного агрегату тощо.

Окремої уваги потребує оцінка сучасних заходів спрямованих на підвищення комплексного показника ефективності РК упродовж роботи (у тому числі енергетичної) через удосконалення технічних приладів поточного моніторингу експлуатаційних показників роботи ХМ і керування роботою її мотор компресорного агрегату, аналізу робочих циклів ХМ тощо, оскільки їх розкриття спирається на відсутність у світовій мережі корпоративних даних провідних виробників холодильних установок і також відсутність на їх фоні пріоритетних нагальних питань, які повинні бути вирішено з ціллю удосконалення максимальної відповідності РК вимогам технічних регламентів міжнародних стандартів.

Таким чином проведення робіт спрямованих на вирішення задачі підвищення енергетичної ефективності ХМ, розробку і впровадження сучасних технічних приладів її діагностики, моніторингу робочих циклів РК упродовж тривалої роботи є значущими і необхідними заходами.

Актуальність. Покращення ефективності перевезень ШПП морським транспортом є пріоритетним напрямком діяльності будь-якої держави у галузі харчової промисловості, оскільки саме вони відносяться до категорії стратегічних товарів і забезпечують сталий розвиток всієї економіки.

За даними міжнародного інституту холоду загальна кількість перевезень ШПП морем і кількість вироблених РК у світі зростатиме до кінця 2025 року таким чином, щоб обсяг вантажу, температурний режим утримання якого контролюється і регулюється упродовж перевезення морем, перевищив 75% від загального. Світові компанії, що виробляють РК, до кінця 2025 року бачать єдину реальну можливість підвищення енергетичної ефективності застосованих в РК холодильних установок -

						Лист
						5
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

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 математична модель гідравлічних процесів (задача флюїдної динаміки Навьє-Стокса) примусового руху охолодженого повітря від випарника до най віддалених ділянок всередині контейнера, яка постає підґрунтям для розрахунку поля температур (задача конвекції і тепло масо переносу Лапласа) на рівні проектування РК..

					ДП ЕН-141а 2.23	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		7

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТЕМИ

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 рефрижераторних контейнерів для морських перевезень швидкопсувних продуктів з за кордону, або іншої 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 рефрижераторних контейнерів та відсутністю контролю державних інституцій за споживаною ними енергією. Інша причина – відсутність методики та заходів з контролю, діагностики, які би дозволили оперативно встановлювати ефективність рефрижераторних контейнерів за показниками кількості тепла вилученого з камер охолодження або морозильних по відношенню до потужності спожитої 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.

					ДП ЕН-141а 2.23	Лист
						8
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Тенденція, яка склалась за останнє десятиріччя у поновленні парку рефрижераторних контейнерів 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.

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 18°C. 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:

					ДП ЕН-141а 2.23	Лист
						9
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

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

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

- 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 2.23	Лист
						11
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ГАЛУЗІ РЕФРИЖЕРАТОРНИХ КОНТЕЙНЕРІВ І АНАЛІЗ РОБОТИ ЇХ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ

Контейнерні перевезення вважаються найбільш вдалим і ергономічним способом транспортування вантажів з мінімальними транспортними витратами та при збереженні їх неушкодженими.

Контейнерна революція, яку розпочато у середині минулого століття завершилася у 1979 році завдяки застосуванню такими державами як Австралія, Королівство Швейцарії, Малайзії, Індії, Федеративної республіки Бельгії, Польщі, Мексики, Швеції, Німеччини, Іспанії, Болгарії, Румунії, Нідерландів, Югославії, Франції, Італії, Угорщини, СРСР, Нової Зеландії, Південно-Африканської Республіки, Чехословаччини, Ірландії, Данії, США, Об'єднаного Чилі, Китаю, Ізраїлю, Туреччини, Японії, Канади суспільних стандартів щодо їх технічних характеристик – габаритних розмірів, допусків на встановлення і фіксацію та наявність інших компонентів, що забезпечують технологічні можливості щодо перевезень вантажів [7,8,9]. Відтоді, незалежно від виробника, кожен новий контейнер повинен відповідати міжнародним стандартам [4,5,6] і з легкістю встановлюватись на суховантажному судні, залізничній платформі або контейнеровозі будь-якої держави світу. Контейнери в Україні не виробляють, а ті, що придбають закордоном, повністю відповідають міжнародним стандартам [2,3], а тому на рівних приймають участь у міжнародних перевезеннях вантажу.

1.1. Класифікація рефрижераторних контейнерів

Діючі стандарти встановили жорсткі вимоги до типорозмірів контейнерів, а саме:

- великотоннажні з корисною масою вантажу від 10 до 30 тонн із кутовими фітингами – типорозміри 1AA та 1CC ємністю до 50 м³;

					ДП ЕН-141а 2.23	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		12

машину, що працює на хладону (вбудовану чи змінну) та дизель-генераторну установку або систему охолодження рідиною азоту. Хладонові ХМ можуть отримувати живлення від зовнішнього джерела енергії або від власного дизель-генератора. Понад 90 % від загального парку РК має машинну систему охолодження.

РК середнього тоннажу оснащують системою машино-акумуляційного охолодження. В акумуляційних охолоджуючих приладах застосовують евтектичні розчини. Вони мають листотрубні елементи між якими розташовані мішки з морозостійкої плівки заповненої евтектичними розчинами. Малотоннажні контейнери як правило не мають системи охолодження, отже є ізотермічні.

1.2. Загальний устрій і особливості роботи РК провідних виробників

Зовнішній вигляд РК типу 1СС наведено на рис.1.2. Корпус РК є несучим каркасом складеним з пінополіуретанових сандвіч-панелей із зовнішнім покриттям дюралюмінієвими листами товщиною 2 мм і внутрішнім покриттям профільованою листовою неіржавіючою сталлю товщиною 0,6 мм. Підлогу РК виготовлено Т - подібним алюмінієвим профілем. Двері виготовлено як і корпус та оснащено герметичними запорами. Рефрижераторний агрегат, приєднаний до торця корпусу, підтримує в автоматичному режимі всередині корисного об'єму контейнера задану температуру в межах $\pm 35^{\circ}\text{C}$ і отримує зовнішнє живлення від 3-фазної електричної мережі з напругою 380/460 В і частотою струму 50/60 Гц.

Загальний час виходу холодильно-обігрівального агрегату РК у сталий режим роботи без завантаження ШПП повинен знаходитись в межах 6 – 18 годин у залежності від тоннажності і встановленої всередині об'єму температури. Режим обміну повітря на свіже, при перевезенні

					ДП ЕН-141а 2.23	Лист
						15
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

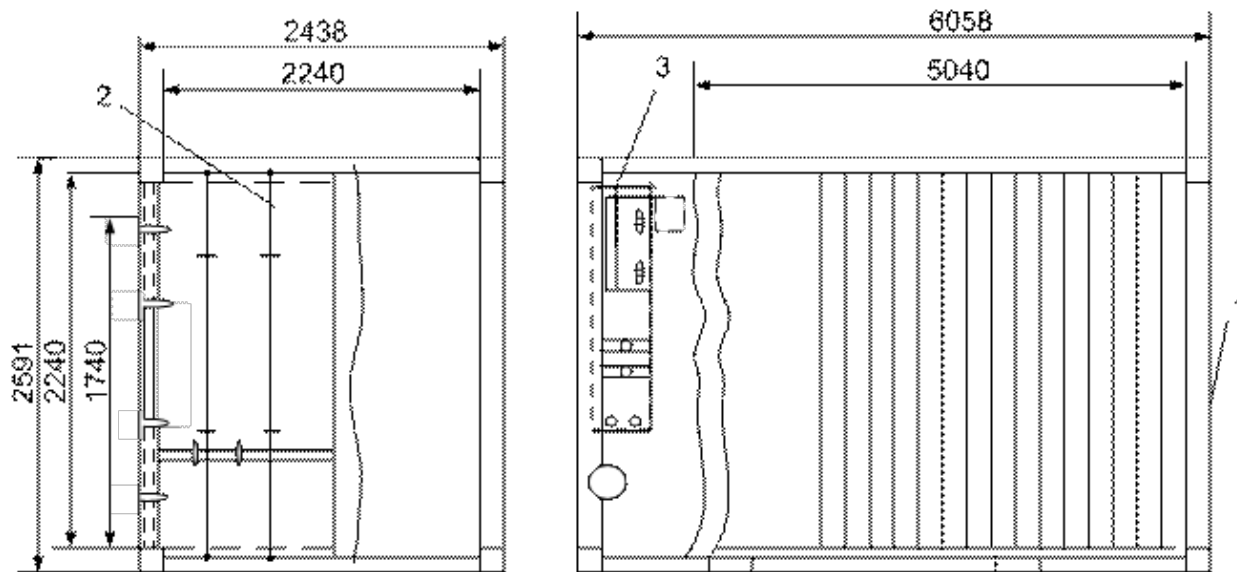


Рис.1.2. Зовнішній вигляд РК типу 1СС із габаритними розмірами де: 1 – корпус контейнера; 2 – двері притуленого типу; 3 – рефрижераторний агрегат

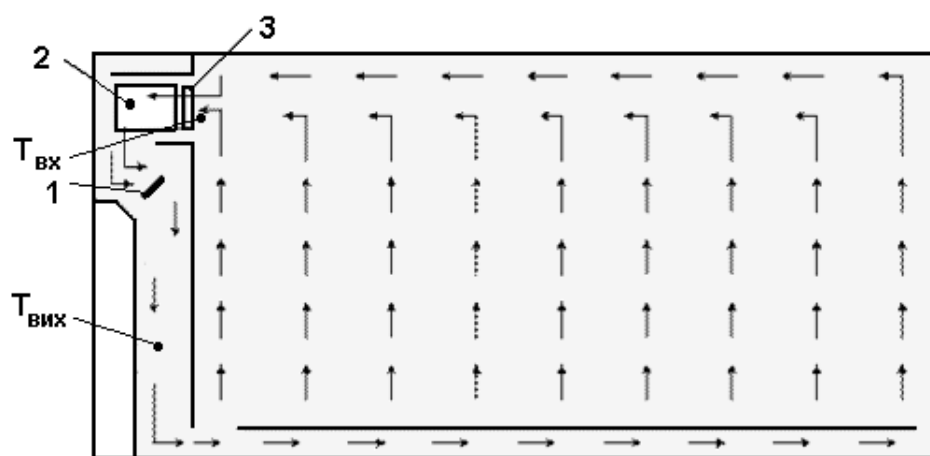
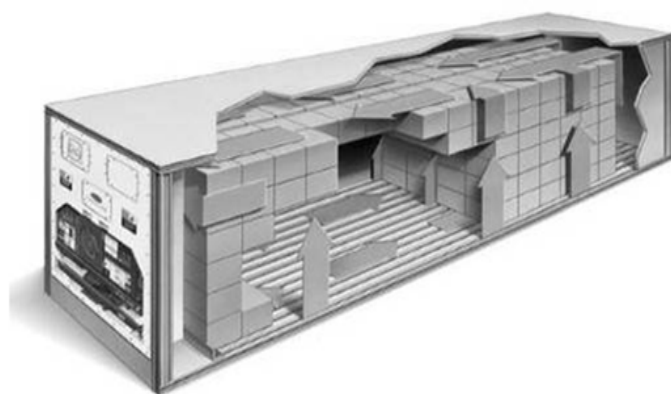


Рис.1.3. Схеми примусової циркуляції повітря в РК типу 1СС фірми Carrier Transicold. де: 1 – вентилятори випарника; 2 – випарник; 3 – обігрівальний елемент

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

плодоовочевих продуктів, знаходиться в межах 2...3 вільних від вантажу об'ємів контейнера у час.

Потік повітря заданої температури витікає з рефрижераторного агрегату всередину контейнера на рівні підлоги, потрапляє у T-подібні профілі підлоги і тільки в кінці контейнера піднімається вздовж дверей до стелі, а відтоді повертається до рефрижераторного агрегату, рис.1.3. Під час циркуляції повітря, у залежності від встановленого режиму роботи РК, нагріває або охолоджує внутрішній об'єм контейнера, забезпечуючи тим температуру і вологість, необхідні для підтримання встановленого режиму зберігання ШПП. Для забезпечення ефективного обміну повітря всередині контейнера, відстані між вантажем і стелею повинна бути не менше 0,12м.

Технічні характеристики РК найбільш розповсюджених розмірів 1СС та 1АА наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Технічні характеристики РК

Технічні характеристики	20-футовий TEU	40-футовий 2TEU	40-футовий FEU High Cube
Габаритні розміри:			
Довжина (мм)	6058	12192	12192
Ширина (мм)	2438	2438	2438
Висота (мм)	2591	2591	2895
Внутрішні розміри:			
Довжина (мм)	5513	11038	11038
Ширина (мм)	2284	2282	2282
Висота (мм)	2269	2252	2557
Внутрішній об'єм (м ³)	28	57-59	66-68
Власна вага (кг)	2900	3900	4100
Максимальна вага вантажу (кг)	21950	27990	27990
Загальна вага (кг)	25000	32500	32500
Холодильна продуктивність (кВт)	3,37...4,88	3,95...4,88	
Теплова продуктивність (кВт)	4,88...5,12	5,82...6,05	
Споживання електроенергії (кВт)	4...6	4...6	
Застосовані хладони	R-134a, R-409a (t _{кипіння} = -29° C)		
Напруга живлення	380/460 В, трифазна, частота струму 50 Гц		

Саме питання обміну повітря або швидкості його циркуляції в корисному об'ємі РК є дуже важливим, оскільки воно суттєво впливає не тільки на температуру, вологість - при збереженні якості плодоовочевого вантажу, але і на відведення шкідливої дії вуглекислоти, що виділяється з нього у часі і тим зіпсує якість. Однаково це стосується збереження м'ясної і рибної продукції оскільки її вивітрювання від надлишку швидкості повітря, утвореного примусовою циркуляцією вентилятора випарника призводить до втрати вантажем ваги.

1.2.1. Особливості устрою холодильної установки

Особливості устрою розглянемо на прикладі РК типу 69NT-511-300 виробника фірми «Carrier». Холодильну установку (ХУ) з живленням від електричного приводу виконано у вигляді цільного блоку і призначено для встановлення на торці РК. Холодильний агрегат заправлений хладоном R-134a із компресорним маслом POE SW20 оснащено датчиками сенсорами і контролером температури. Ряд вузлів ХУ допускає роботу від двох напруг живлення: 190/230 або 380/460 В із частотою струму 50/60 Гц. Для живлення на нижчій ступені напруги використовують зовнішній понижуючий автотрансформатор. Загальний вигляд ХУ наведено на рис. 1.4.

Живлення кола управління роботою РК здійснюється окремим трансформатором напругою 18...24 В. Для контролю температури застосовано мікроконтролер (Data CORDER, Micro-Link 2i) який оснащено інтегрованим електронним пристроєм обліку даних.

За допомогою контролера встановлюється необхідна за режимом транспортування вантажу температура, значення якою, упродовж часу роботи РК, може підтримуватись з точністю $\pm 0,4$ °С. Система управління автоматично обирає режим охолодження, очікування або нагріву, який необхідний для підтримання необхідної температури в РК. Відсік

					ДП ЕН-141а 2.23	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		18

випарника наведено на рис.1.5. Під час транспортування вантажу електричні двигуни випарника працюють з найвищою швидкістю при температурі у РК більше (-10 °С) або за вибором (-5 °С).

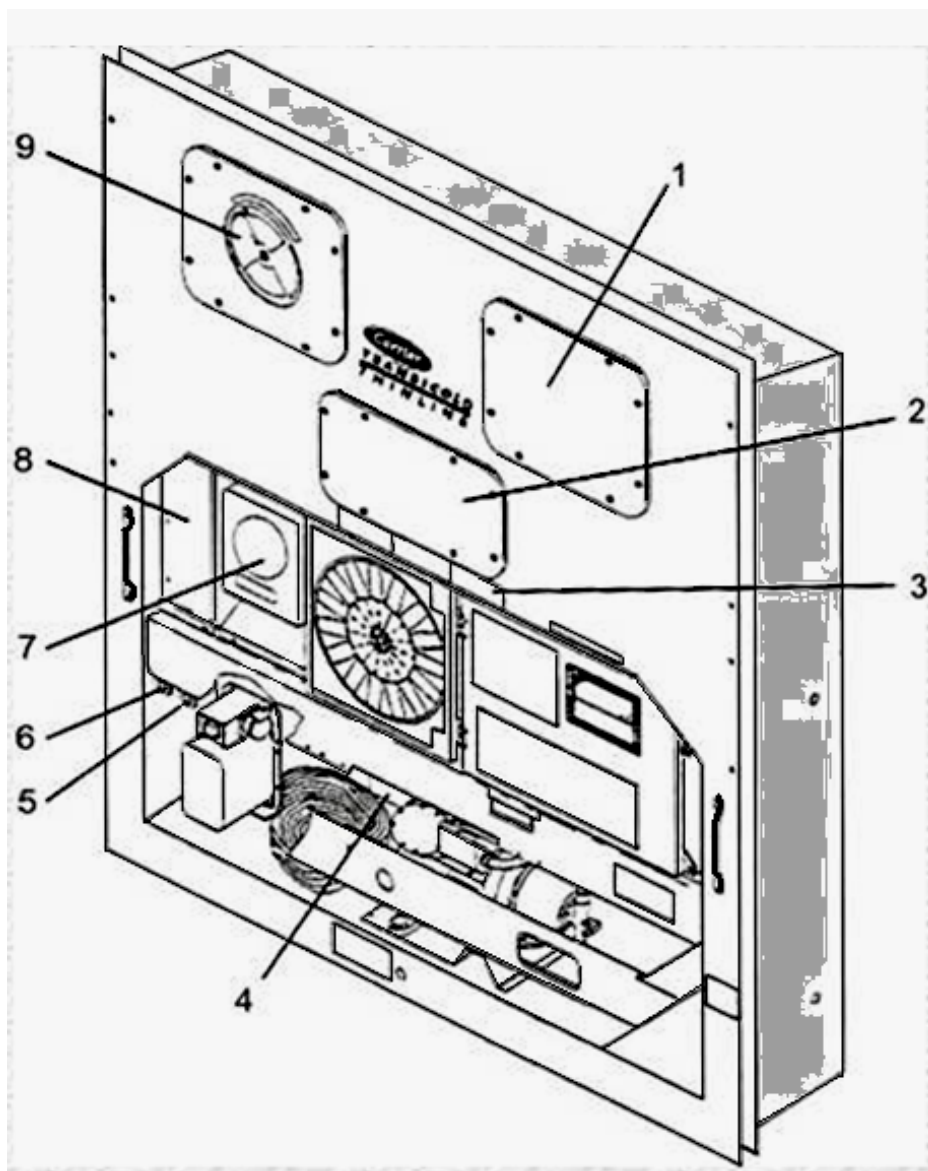


Рис.1.4. Холодильна установка 69NT-511-300 «Carrier» де: 1, 9 – панелі доступу до електричних двигунів вентиляторів випарника; 2 – панель доступу до нагрівача та термостату; 3 – відсіки для переміщення при установці в РК; 4 – відсік компресора та ідентифікаційний номер комплектації (PID); 5 – штекер для зв'язку з системою Trans FRESH (TCC); 6 – штекер контролюючого пристрою; 7 – механічний або електронний регістратор температури; 8, 9 – отвори підпитки чистого повітря

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

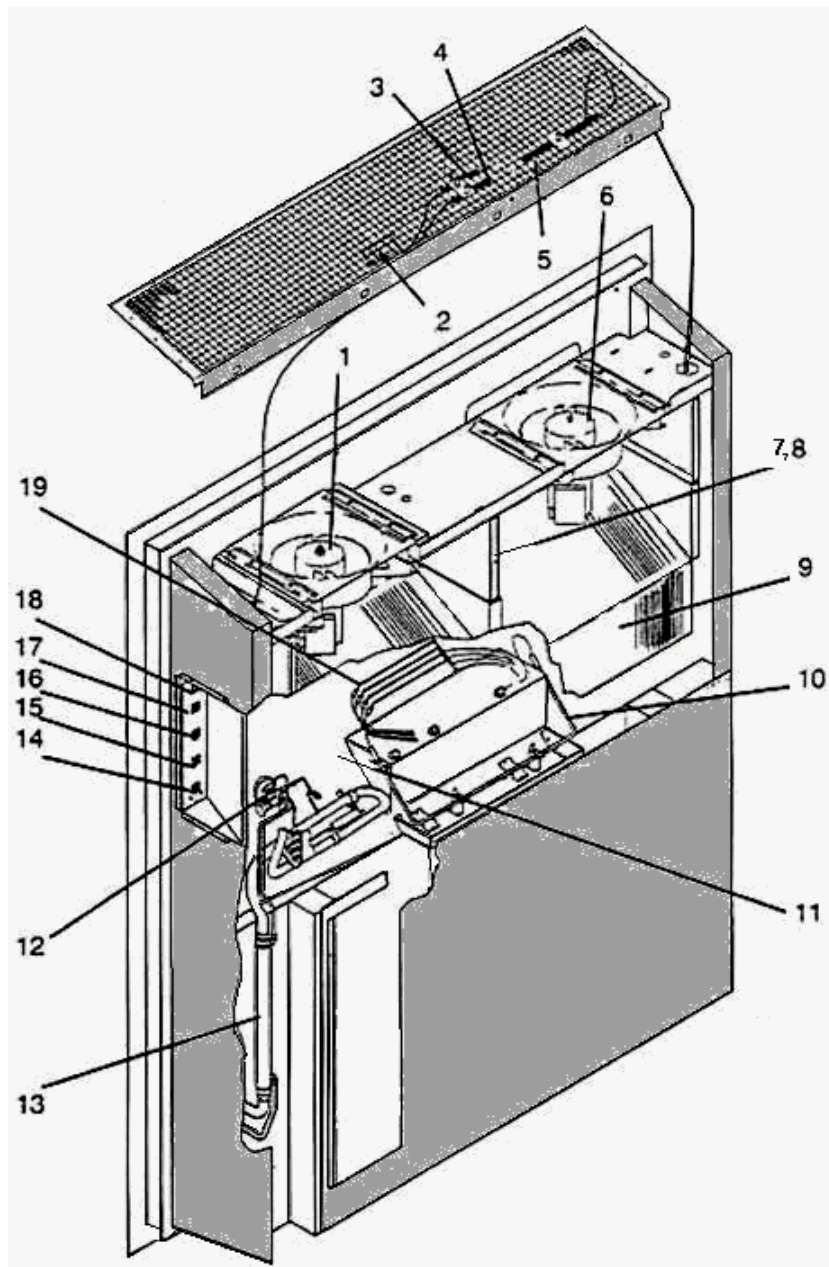


Рис.1.5. Відсік випарника: 1 – електричний двигун вентилятора випарника №1 (EM1); 2 – датчик вологості (HS); 3 – датчик відпрацьованого повітря регістратора (RRS); 4 – датчик температури відпрацьованого повітря (RTS); 5 – механічний регістратор температури; 6 – електричний двигун вентилятора №2 (EM2); 7 – датчик завершення відтаювання (DTS); 8 – термостат завершення нагріву (НТТ); 9 – випарник; 10 – нагрівач піддону (DPH); 11 – герметичний розширювальний клапан термостата; 12 – розширювальний клапан термостата; 13 – теплообмінник; 14 – розетка опитувального пристрою (1С); 15 – розетка датчика USDA (PR2); 16 – розетка датчика USDA (PR1); 17 – розетка датчика USDA (PR3); 18 – розетка датчика вантажу (PR4); 19 – нагрівачі випарника

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

На рис. 1.6 наведено відсік конденсатора ХМ. Під час його роботи зовнішнє повітря всмоктується вентилятором знизу, пересувається горизонтально і виходить через решітку конденсатора, виконану з трубок Вентурі, охолоджуючи його. При температурі оточуючого середовища нижче 27 °С вентилятор конденсатора вмикається і вимикається періодично у залежності від тиску у ньому і мінімального часу його увімкнення (три хвилини) або вимкнення. Відтак, якщо тиск у конденсаторі більше 714,3кг/м² або конденсатор не працював понад 60 секунд вентилятор вмикається автоматично, а вимикається при тиску у конденсаторі нижче 464,3 кг/м² або коли конденсатор відпрацював не менш як 30 секунд. Якщо температура оточуючого середовища вище 27 °С, коло управління тиском конденсатора вимикається і вентилятор працює безперервно.

1.2.2. Робота холодильної машини рефрижераторного контейнера

Працює ХМ РК наступним чином. Всмоктуваний мотор-компресорним агрегатом хладон стискається. Його тиск і температура у повітряному конденсаторі зростають. З конденсатора повітряного охолодження пари хладону потрапляють до конденсатора водяного охолодження в якому, проходячи через теплообмінник, охолоджується до температури насичення і в стані рідини витікає з конденсатора під високим тиском через вентиль, що регулюється уручну. Далі через фільтр-осушувач, індикатор вологості і теплообмінник, в якому рідина хладону додатково охолоджується, вона потрапляє до розширювального клапану термостата. При проходженні рідини хладону через отвір розширювального клапану його частина випаровується і складає втрати. Та ж рідина хладону, яка потрапляє у випарник поглинає теплоту відпрацьованого повітря у РК, перетворюючись у пару. Відпрацьована

					ДП ЕН-141а 2.23	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		22

пара хладону всмоктується компресором через регулюючий клапан всмоктування, який оснащено кроковим двигуном. Термочутливий патрон розширювального клапану, розташований на лінії всмоктування біля виходу з випарника, управляє роботою розширювального клапана термостату. Він підтримує постійний нагрів пари хладону на виході з випарника незалежно від навантаження РК.

Узагальнені схеми холодильного контуру з ресивером та конденсатором водяного охолодження та такі, що працюють за стандартною схемою наведено на рис. 1.7, рис. 1.8, відповідно.

На схемі холодильного контуру, рис.1.9, наведено роботу економайзера при частковому поверненні пари хладону після її стискання у конденсаторі, для обмеження продуктивності компресора при його малому навантаженні.

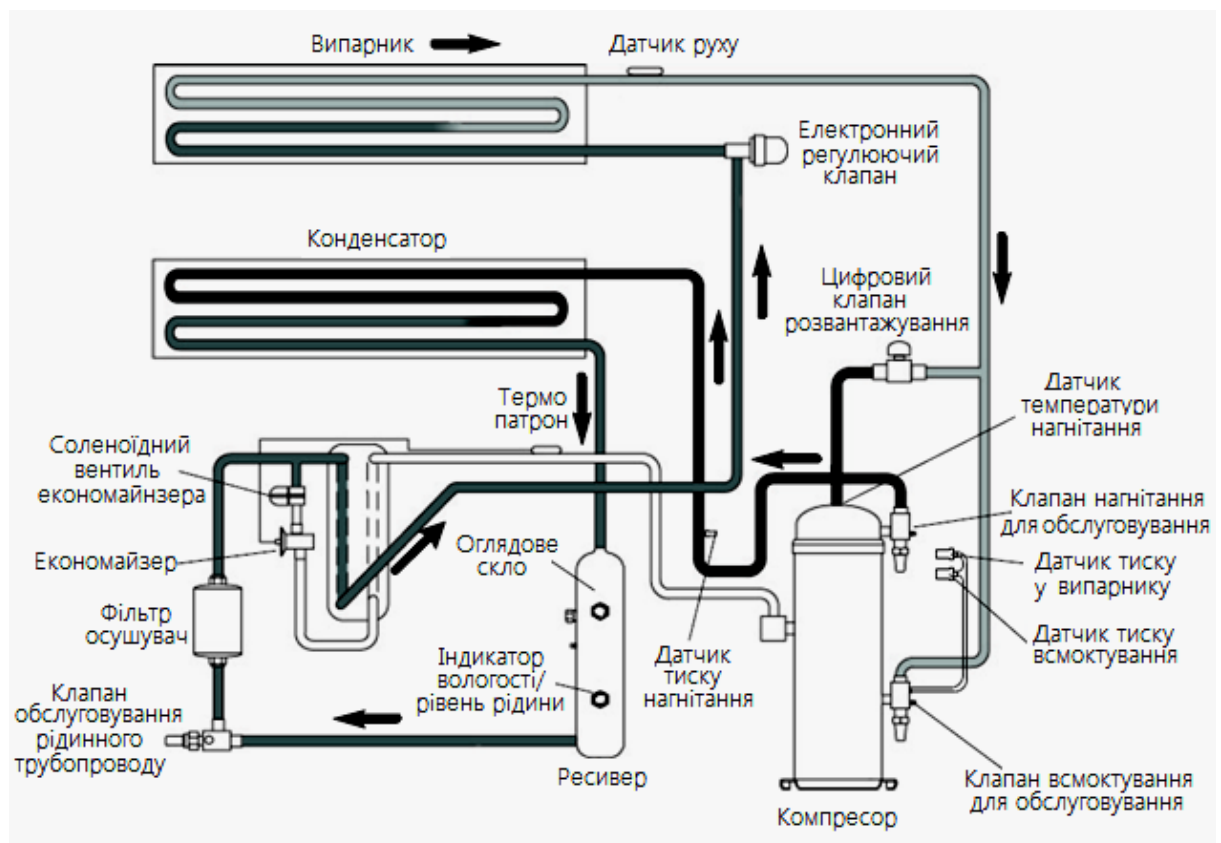


Рис.1.7. Схема холодильного контуру з ресивером – стандартна робота

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

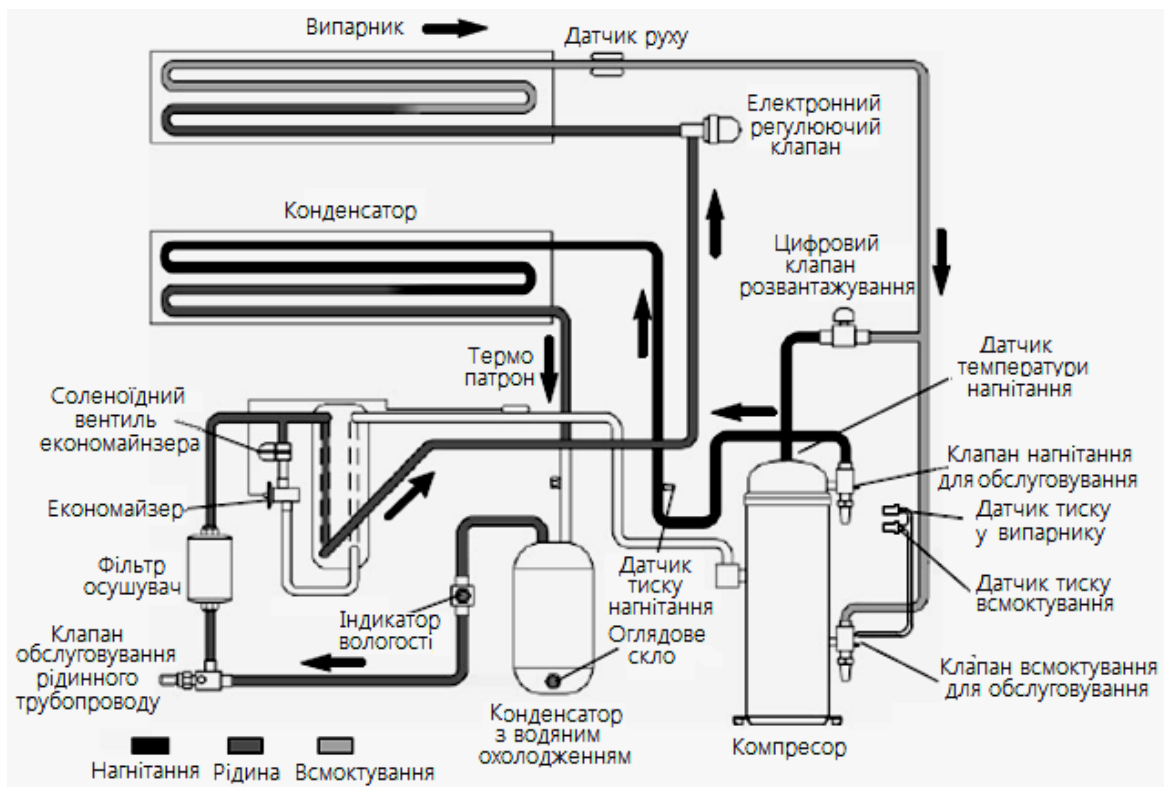


Рис.1.8. Схема холодильного контуру з конденсатором водяного охолодження – стандартна робота

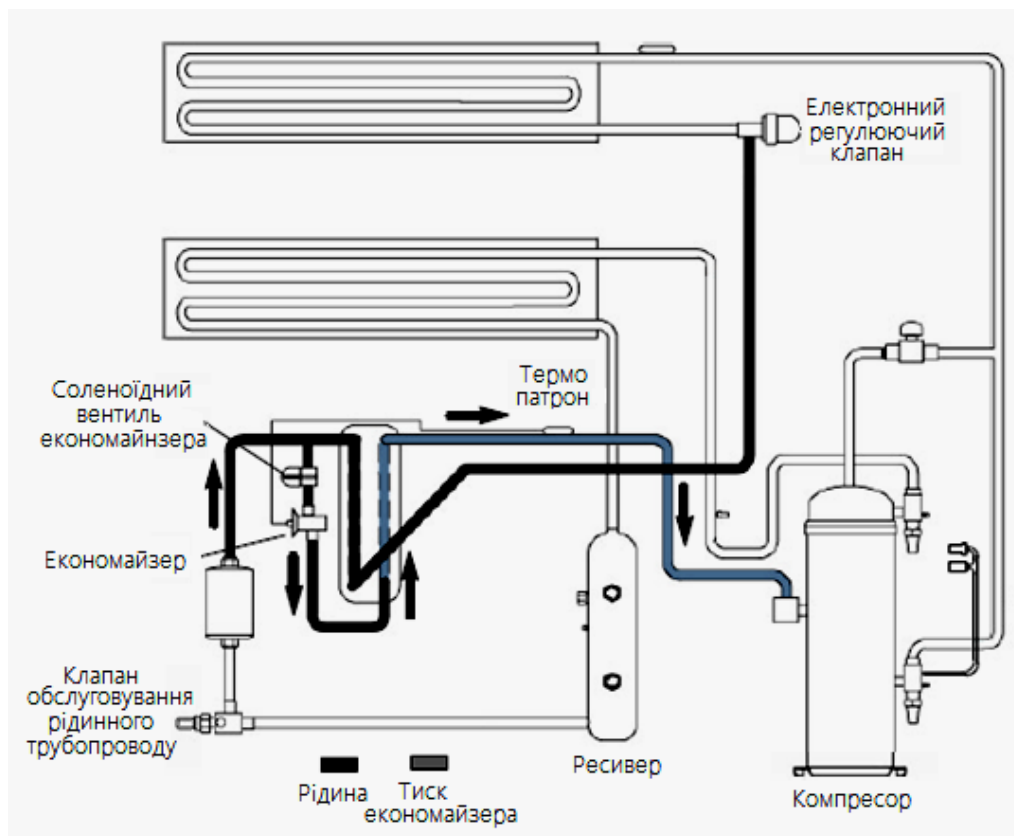


Рис.1.9. Схема холодильного контуру – робота економайзера

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

За даними виробників РК вони забезпечують не тільки підтримання температури в корисному об'ємі в межах $\pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ із точністю $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ але і задану вологість повітря та/або його склад. Ця можливість є дуже цінною при перевезенні фруктів. Наприклад, для температури у РК $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, повітря повинне мати вологість 65 %, склад кисню 4 % і вуглекислоти 6 %. В практиці застосовують РК і з режимом глибокого заморожування до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Усі конденсатори РК мають повітряне охолодження, але є і з водяним охолодженням від зовнього джерела. Вентилятори повітряного охолодження у цьому випадку також вмикаються. Така опція є дуже важливою, якщо до 50 одиниць РК розміщуються у трюмі, де температурає значно вища ніж на палубі. До потрапляння рідини фреону у випарник вона проходить через ресивер, фільтр осушувач і ТРВ. Задача ТРВ не тільки пропустити фреон через жиклер, внаслідок чого він розшириться і перетвориться у газ який охолоджується сам і охолоджує випарник але і пропустити таку його кількість, щоб вона, проходчи у випарнику, уся випарилась. Температура на виході з випарника повинна бути трохи вищою за температуру після ТРВ, наприклад, як -25°C та -30°C . З часом випарник обмерзає і його слід відтаяти, інакше продуктивність випарника падає. Пауза між відтайками може встановлюватись уручну через 3,6,12,24 години або у режимі АВТО. Керує цим режимом мікропроцесорний контролер в якому вбудовано даталогер, що записує усі контролюємі дані в межах часу від 1 хвилини до 4 годин і упродовж терміну роботи РК до восьми років.

Режим роботи РК залежить від потрібної в ньому температури. Якщо вона менше -5°C , то контролер утримує її по виходу з контейнера. При цьому температура повітря, який нагнітається у контейнер вздовж підлоги значно нижче. Так, при температурі охолодження -18°C , температура нагнітаємого повітря на рівні -26°C . Компресор при цьому працює в режимі пуск/стоп. Вмикається коли температура зросте на 1°C і

						Лист
					ДП ЕН-141а 2.23	26
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

То якою його температура буде на виході з контейнера залежить тільки від вантажу і ступеня його охолодження. Одною з останніх розробок фірми Carrier є версія PK Prime Line з гвинтовим компресором нового типу Scroll Type. Загальний вид мотор-компресорних агрегатів з гвинтовим компресором від провідних світових виробників наведено на рис. 1.12.

1.3. Основні параметри діаграми циклу роботи компресійної ХМ

Діаграма циклу застосовується для побудови і розрахунку циклу роботи ХМ та визначення параметрів хладону в будь-якій точці процесу, що розглядається і для встановленого типу хладону. Згідно до призначення, компресор на роботу якого витрачається електрична енергія, всмоктує із випарника суху насичену пару хладону при низькому тиску кипіння P_0 і температурі кипіння t_0 . На діаграмі $P-i$ (тиск - ентальпія) стан хладону відповідає точці 1 теоретичного циклу, яка знаходиться на правій межовій кривій пароутримання, рис. 1.13. Після цього компресор здійснює адіабатичне стискання пари хладону (процес 1-2) до тиску у конденсаторі P_K . При цьому пари хладону нагріваються до температури нагнітання (перегріву стискання) за рахунок роботи стискання у компресорі і потрапляють до конденсатора, точка 2. В конденсаторі пара хладону. У конденсаторі пара хладону при постійному тиску P_K на початку охолоджується від температури перегріву до температури конденсації t_K (процес 2-а), а потім конденсуються (процес а-3) при постійному тиску P_K і температурі t_K в процесі відводу тепла від хладону крізь стінки реберних труб повітря, що омиває конденсатор. Далі рідина хладону з високим тиском і помірною температурою накопичується у циліндричному посуді - ресивері (точка 3). З ресивера рідина хладону потрапляє до регулюючого вентиля, проходить крізь нього та дроселюється (ізоентальпійний процес 3-4) з пониженням тиску від P_K до P_0 і температури від t_K до t_0 . Після цього, паро рідинна суміш направляється до випарника, в якому рідина хладону

					ДП ЕН-141а 2.23	Лист
						28
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

кипить з постійним тиску P_0 і температурою t_0 (процес 4-1), віднімаючи тепло від об'єкта охолодження за рахунок теплопередачі та конвекції повітря з поверхнею випарника. Утворена у випарнику пара хладону висмоктується компресором і робочий цикл повторюється.

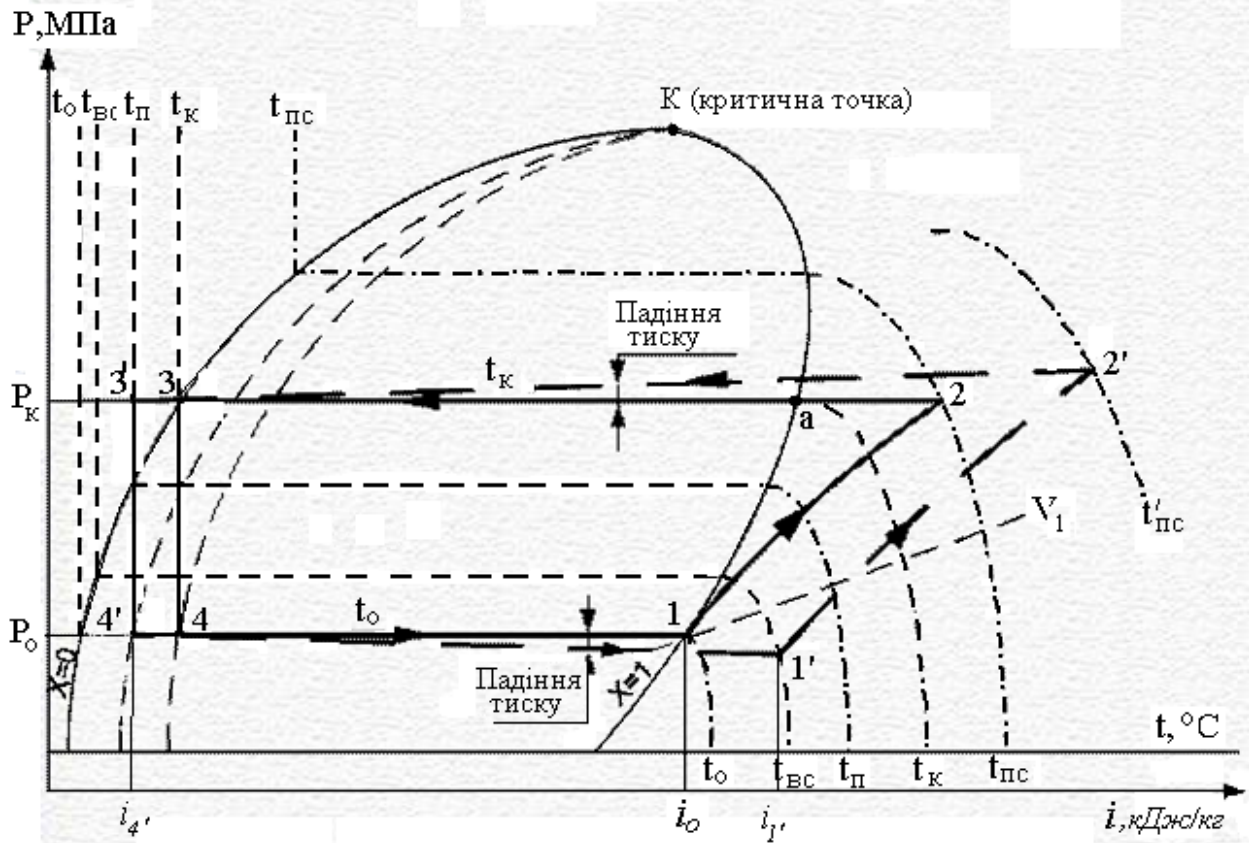


Рис.1.13. Цикли парової компресійної ХМ 1-2-3-4 – теоретичний та 1'-2'-3'-4' - дійсний

Для існуючих РК основні параметри робочого циклу ХМ, для температури оточуючого повітря $t_{0П}$, температури зберігання вантажу t_B і відомої марки хладону, визначають наступним чином:

- температура кипіння хладону у випарнику при безпосередньому охолодженні $t_0 = t_B - (10 \dots 12), ^\circ\text{C}$;
- температура всмоктуваної пари хладону $t_{вс} = t_0 + (10 \dots 15), ^\circ\text{C}$;
- температура конденсації пари хладону $t_к = t_{0П} + (12 \dots 15), ^\circ\text{C}$;

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

- температура переохолодження рідини хладону в конденсаторі $t_{\Pi} = t_K - (3 \dots 5), ^\circ\text{C}$.

За отриманими даними, дійсний цикл парової компресійної холодильної машини порівняно з теоретичним, наведено на рис. 1.13.

Дійсний цикл ХМ децю відрізняється від теоретичного внаслідок того, що:

- компресор всмоктує не суху насичену пару хладону (точка 1), а перегріту пару (точка 1'), оскільки має місце перегрів пари у випарнику, трубопроводі всмоктування або спеціальному теплообміннику для перешкодження потрапляння капель рідини хладону до компресора;

- має місце тертя хладону о стінки труб у випарнику, конденсаторі і спадає тиск в них, а, відтак, процес стискання пари хладону в компресорі для дійсного циклу (між точками 1' і 2') потребує більшої витрати зовнішньої роботи ніж в теоретичному циклі;

- рідина хладону переохолоджується в конденсаторі, переохолоджувачі або теплообміннику (процес 3 - 3') для забезпечення 100% утримання рідини до регулюючого вентиля і збільшення корисної холодильної продуктивності;

- мають місце втрати на тертя як у компресорі так і за його межами;

- стискання пари хладону в компресорі здійснюється не при постійній ентропії.

За даними дійсного циклу визначимо питому вагову і об'ємну холодильні продуктивності в робочих умовах ХМ: $q_0 = i_{4'} - i_{4'}$, $\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$; $q_V^p = \frac{q_0}{V}$, $\left(\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}\right)$.

Стандартна холодильна продуктивність холодильної установки становить

$$Q_{\text{ст}} = \frac{Q_{\text{БР}} \cdot \lambda_{\text{ст}} \cdot q_V^{\text{ст}}}{\lambda_p \cdot q_V^p},$$

Різницю температур на вході та виході з випарника приймають в межах 3...5 °С.

Потужність електричних нагрівачів для підтримання температури перевезення вантажу взимку $N_e = \frac{Q_{CP}}{3600 \cdot \eta_e}$, кДж/год., де $\eta_e=0,83$ – ККД електричного обігріву.

1.4. Напрямки розвитку параметричного ряду РК

Під РК будемо вважати пристрій для розміщення в ньому та тимчасового утримання різноманітних об'єктів температура зберігання властивості яких знаходиться в межах ± 35 °С і забезпечується спільною роботою компресорної ХМ до складу герметичної тепломеханічної системи якої входить мотор-компресорний агрегат, конденсатор, ТРВ, випарник тощо, заправлені штучною хімічною речовиною – робочим тілом – хладоном. Існуючим РК притаманні такі позитивні якості: параметричні ряди РК з корисним об'ємом 28...68 м³ найпростіші у виготовленні і складені з двох модулів (ХМ - холодильна шафа), мають приємний за безпечністю у обслуговуванні рівень енергоспоживання; герметична система ХМ робить її надійною під час тривалої роботи у будь-яких умовах оточуючого середовища; однакова топологія холодильної шафи РК і уніфіковані ХМ спрощують їх обслуговування та штучний ремонт за місцем застосування при транспортуванні вантажу; безпечність застосованого в них хладоноу, можливість тривалої роботи в умовах низької якості живлення електричною енергією роблять їх безальтернативними охолоджувачами.

Топологічний аналіз РК дозволяє встановити напрями розвитку РК, а саме шляхом:

- застосуванням екологічно безпечного і енергетично ефективного хладоноу;

										Лист
										32
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

- визначенням оптимального об'єму шафи охолодження за показником мінімального припливу тепла із зовні;
- впровадженням більш ефективної теплоізоляції або збільшенням її шару за показником зростання показника енергетичної ефективності ХМ;
- забезпечення рівномірного розподілу температури у корисному об'ємі шафи охолодження;
- удосконаленням технічних засобів моніторингу, діагностики, тестування і визначення енергетичної ефективності ХМ та РК;
- застосуванням частотного регулювання швидкості двигуна приводу компресора для варіювання продуктивності ХМ залежно від робочих температур у корисному об'ємі шафи охолодження та потужності принесеного до неї тепла.

Постановка задачі

Для прикладу стаціонарного рефрижераторного контейнера TEU-20 з вихідними даними:

Габаритні розміри:	
Довжина (мм)	6058
Ширина (мм)	2438
Висота (мм)	2591
Внутрішні розміри:	
Довжина (мм)	5513
Ширина (мм)	2284
Висота (мм)	2269
Внутрішній об'єм (м ³)	28
Власна вага (кг)	2900
Максимальна вага вантажу (кг)	21950
Загальна вага (кг)	25000
Холодильна продуктивність (кВт)	3,37...4,88
Теплова продуктивність (кВт)	4,88...5,12
Споживання електроенергії (кВт)	4...6
Застосовані хладони	R-134a, R-409a (t _{кипіння} = -29° C)
Напруга живлення	380/460 В, трифазна, частота струму 50 Гц

підлягає вирішенню питання розробки підсистми комп'ютерного розрахунку поля швидкостей примусового руху повітря в випарнику і корисному об'ємі 20 футової холодильної камери.

2. ТЕРМОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ РЕФРИЖЕРАТОРНОГО КОНТЕЙНЕРА

2.1. Моделювання швидкості руху повітря у відсіку випарника холодильної установки

Щорічне виробництво швидкопсувних харчових продуктів в світі сягає 4 мільярдів тонн, з яких майже половина має малий термін зберігання, а відтак залежить від засобів і умов їх зберігання під час перевезень. Об'єми перевезень визначаються попитом споживчого ринку. Оскільки перевезення здійснюється упродовж тривалого часу і в умовах коливань температури оточуючого середовища в межах $\pm 50^{\circ}\text{C}$, суттєвої уваги отримують технічні засоби, які забезпечують зберігання їх якості – рефрижераторні контейнери.

Питання встановлення потрібної швидкості циркуляції повітря в корисному об'ємі рефрижераторного контейнера є дуже важливим, оскільки суттєво впливає не тільки на температуру, вологість збереження якості плодоовочевого вантажу під час його тривалого транспортування, але і на відведення шкідливої дії вуглекислоти, що виділяється з нього у часі і тим зіпсує якість. Однаково це стосується збереження м'ясної і рибної продукції оскільки її вивітрювання від надлишку швидкості повітря, утвореного примусовою циркуляцією вентилятора випарника, призводить до втрати вантажем ваги.

На рис. 2.1 наведено зовнішній вигляд трубчастого випарника холодильної установки і його вентилятора примусової циркуляції повітря від виробника Carrier Transicold та таких, що розташовані у металевому кожусі.

Моделювання явища переносу повітря конвекцією найчастіше здійснюють у двомірній постановці задачі. В умовах примусового руху повітря в корисному об'ємі рефрижераторного контейнера і, утворений під його впливом розподіл поля температур, визначається динамікою

$$\left[-\int_S \vec{J}_\rho \cdot \vec{n} dS - \int_S \rho(\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \right]. \quad (2.1)$$

У разі наявності внутрішнього джерела речовини до об'єму надходить її кількість обсягом $\int_V I_\rho dV$, де I_ρ - потужність джерела речовини. Здійснивши перехід від поверхневих інтегралів до інтегралів за об'ємом (теорема Остроградського – Гауса) і скориставшись законом збереження маси речовини в об'ємі, отримаємо рівняння балансу у вигляді виразу

$$\frac{d}{d\tau} \int_V \rho dV = -\int_V \nabla \cdot (\rho \vec{v}) dV - \int_V \nabla \cdot \vec{J}_\rho dV + \int_V I_\rho dV, \quad (2.2)$$

в якому, при двохмірній постановці задачі і у прямокутній системі координат, вектор градієнту $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y}$, а відтак $\nabla \cdot \vec{v}$ - є дивергенцією швидкості. Оскільки інтегрування здійснюється по спільному об'єму, матимемо

$$\int_V \left(\frac{d\rho}{d\tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot \vec{J}_\rho - I_\rho \right) dV = 0$$

з якого витікає, що

$$\frac{d\rho}{d\tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = -\nabla \cdot \vec{J}_\rho + I_\rho. \quad (2.3)$$

Рівняння балансу маси речовини свідчить, що у випадку нехтуванням рухом її молекул $\vec{J}_\rho = 0$ і наявністю внутрішнього джерела речовини

$I_\rho = 0$, воно спрощується до виразу $\frac{d\rho}{d\tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$. Якщо ж розглядати

внутрішнього тертя від зміни в'язкості речовини та дію зовнішніх сил (гравітаційної у випадку, що розглядається).

Рівняння (2.4) не є самодостатнім для вирішення, оскільки має дві шукані величини – вектор швидкості речовини \vec{v} і тензор напруг або щільність молекулярного потоку, яка враховується в'язкістю γ .

При розгляді ізотропних речовин із лінійним законом переносу імпульсу сили, для зменшення кількості невідомих в диференційному рівнянні застосовують реологічне рівняння, яке встановлює залежність між дивіатором напруг (тензором в'язких напруг) $\nabla \cdot \overline{\overline{\sigma}}$ і тензором швидкостей деформацій $\nabla \cdot (\rho \vec{v} \cdot \vec{v})$. В реологічному рівнянні течії в'язкої ізотропної рідини тензор напруг розглядають у вигляді суми двох складових – ізотропної і неізотропної та при їх співвідношенні у виразі як одна до двох третин

$$\overline{\overline{\sigma}} = [p - \varphi(\nabla \cdot \vec{v})] \overline{\overline{\delta}} + \overline{\overline{\gamma}}$$

і в якому φ – об'ємна в'язкість речовини, якою зазвичай нехтують внаслідок малих значень. При ламінарній течії речовини її в'язкість пов'язують із швидкістю за законом Ньютона у вигляді $\gamma = -\eta \frac{\partial v}{\partial n}$, в якому η – динамічна в'язкість речовини; v – швидкість речовини в напрямку руху; n – нормаль до напрямку швидкості. Для загального випадку реологічне рівняння використовують у вигляді

$$\overline{\overline{\gamma}} = -\eta [\nabla \cdot \vec{v} + (\nabla \cdot \vec{v})^T] + \frac{2}{3} \eta (\nabla \cdot \vec{v}) \overline{\overline{\delta}},$$

де $(\nabla \cdot \vec{v})^T$ – тензор спряжений від тензора $\nabla \cdot \vec{v}$ (транспонована матриця).

Із урахуванням останнього, диференційне рівняння Нав'є - Стокса, яке витікає із рівняння переносу імпульсу сили (2.3), отримує вигляд

- стаціонарний і перехідний аналіз;
- лінійний і нелінійний аналіз;
- 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 флюїдної динаміки.

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 швидкості 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.

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 **AxialSymmetry (1D)** та **(2D)** для осесиметричних моделей.

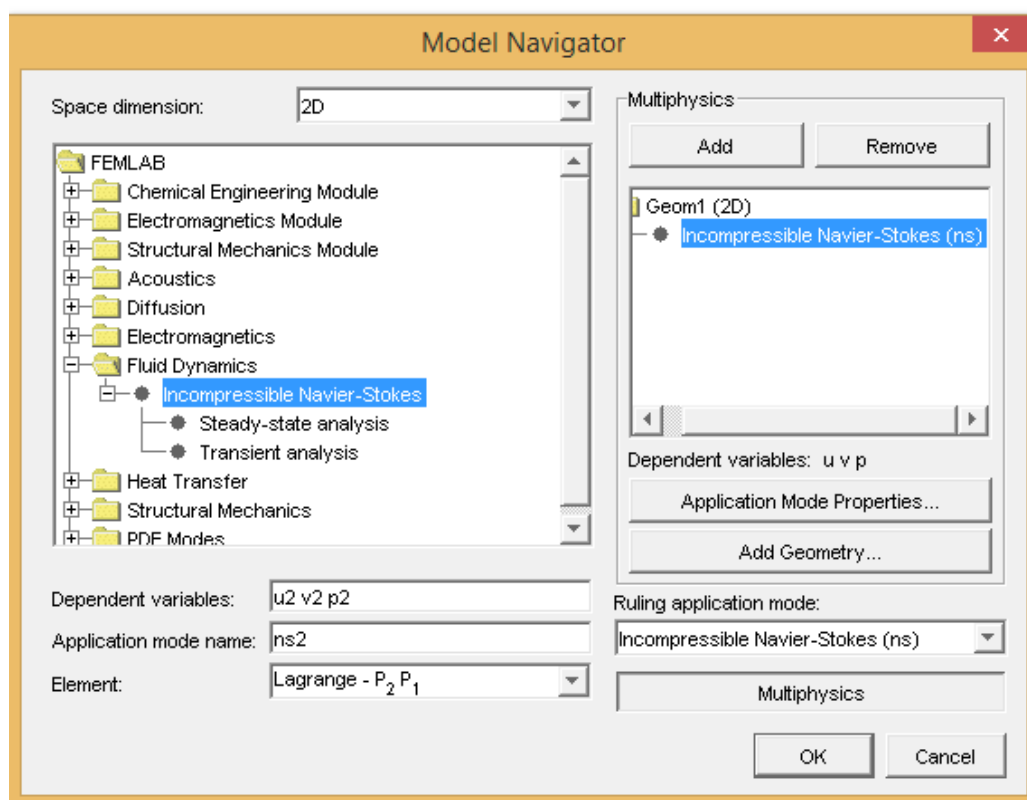


Рис.3.1. Вікно Навігатор моделей

Наступним етапом є вибір фізичного розділу **Fluid Dynamics** [Гідродинаміка]. Цей розділ започатковує рівняння Нав'є-Стокса для нестикаємої рідини.

Щоб утворити мультифізичну модель у віконці **Multiphysics** треба натиснути кнопку **Add geometry** [Додати геометрію]. Після вибору геометрії, натискається кнопка **Add** обрається один чи два фізичних розділів, наприклад один **Incompressible Navier-Stokes**. Для обраного розділу обираємо найпростіший **Steady-state analysis** [Стационарний аналіз].

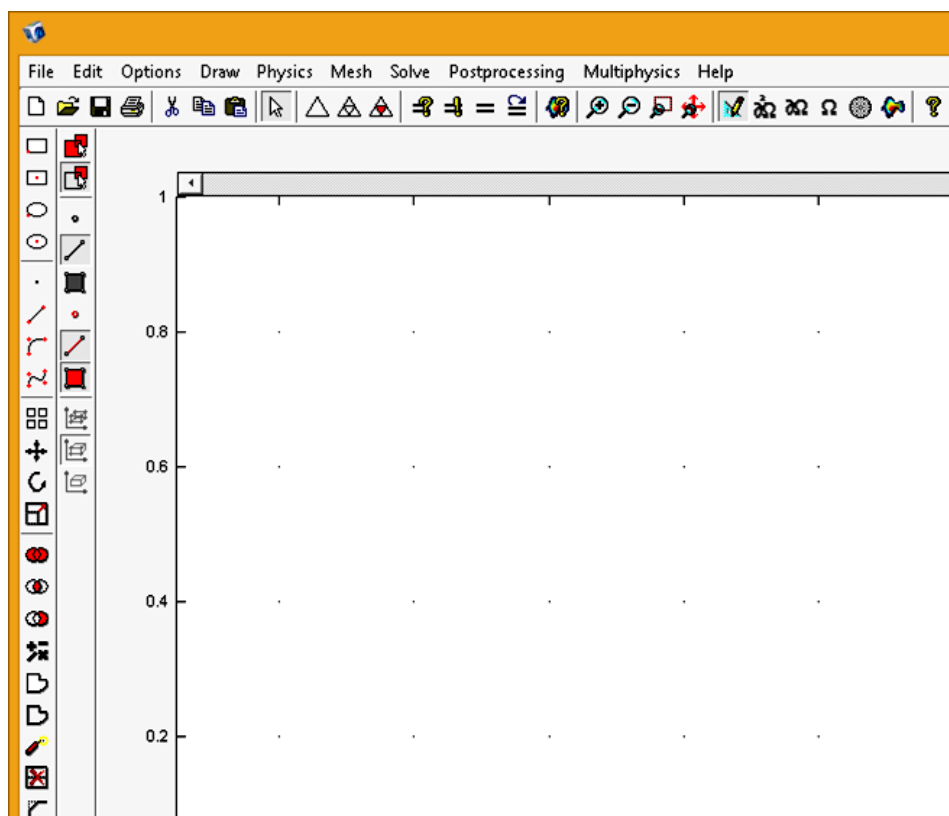


Рис.3.2. Вікно головного меню

Вид кінцевих елементів обираємо по умовчанням **Lagrange-Quadratic** [Лагранжеві-квадратичні]. Після цього тиснемо клавішу **OK** в **Model Navigator** і спостерігаємо вікно програми з робочою областю, інструментальними панелями та головним меню, рис 3.2.

3.1.2. Головне меню

File - утримує команди побудови, відкриття та збереження файлів, а також імпорту геометрії із зовнішніх **CAD** систем.

Edit - утримує команди відміни та повторення операцій, роботи з буфером обміну і команди виділення.

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 двомірних 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 двомірної 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 позицях **x-ylimits** встановлюємо $x_{min}=0$, $x_{max}=4$, $y_{min}=0$, $y_{max}=3$. На вкладці **Grid [Решітка]** знімаємо галочку **Autoi** власноруч встановлюємо інтервал решітки.

Зазвичай при побудові моделі можна задавати просто координати відповідних фігур на робочому столі. Після задання решітки будуюмо контури фігури холодильника, застосовуючи головне меню: **Draw>Specifyobjects**, скориставшись кнопками **Rectangle/Square [Прямокутник/Квадрат]**. Опція **Size** задає розміри об'єкта за допомогою полів **Width [Завширшки]** і **Height [Заввишки]**. **Rotation angle** задає кут повороту прямокутника у градусах тощо.

При завданні складних об'єктів (овали, прямокутники, криві Безьє, лінії, крапки) їх об'єднують або розділяють по фізичним ознакам за допомогою кнопок **Union [об'єднати]**, **Difference [роз'єднати]** і **Intersection [перетин]** або командою **Draw>Create Composite Object**. Ця команда відкриває вікно, де можна вказати з яких елементів складається фігура.

3.1.4. Завдання фізичних властивостей об'єктів і початкових умов

Коли геометрію задано і усі константи визначені завдаємо фізичні властивості. На початку відкриваємо вікно **Physics>Subdomain Settings**: відкривається вікно вводу коефіцієнтів відповідних диференціальних рівнянь, рис. 3.3. Для кожного із фізичних режимів це вікно має особистий вигляд. На рис.3.3 показано це вікно для режиму **Incompressible Navier-Stokes**. Зверху в полі **Equations** вказується диференціальне рівняння. в опції **Subdomain selection** потрібно обрати прошарок для якого встановлюються фізичні властивості. В опції **Physics** задаємо властивості матеріалів. У нашому випадку це густина середовища та його динамічна вязкість та швидкість потоку по усіх осях. Опція **Init** призначена для завдання початкових умов. У нашому випадку це швидкість повітря до початку аналізу.

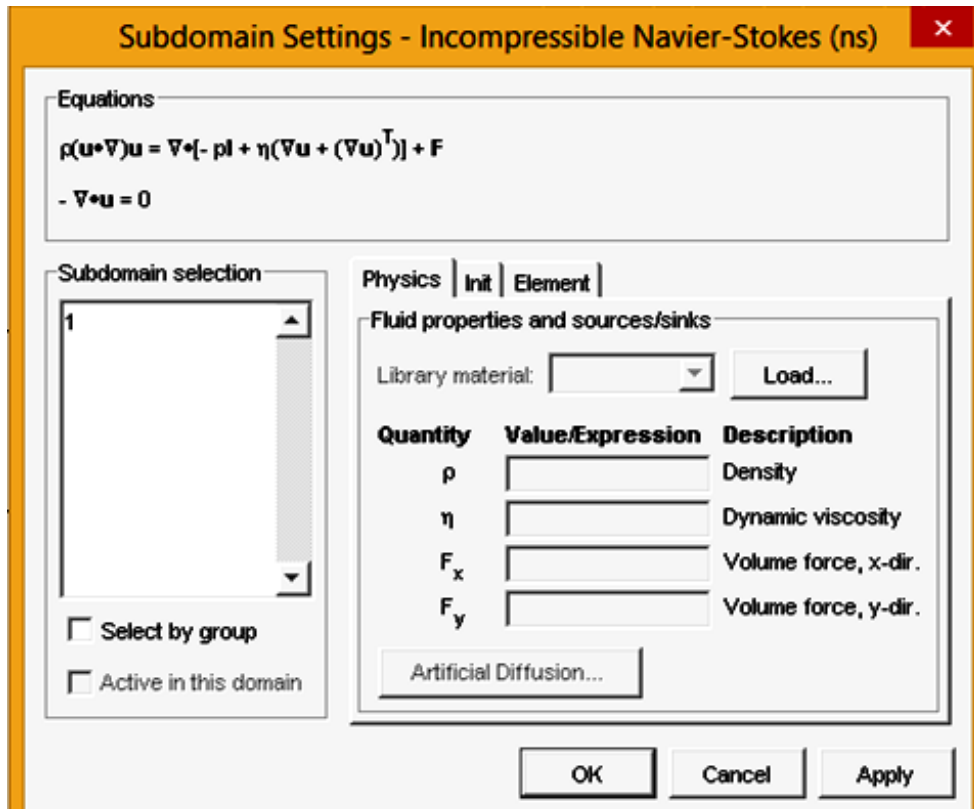


Рис.3.3. Вікно Subdomain Settings

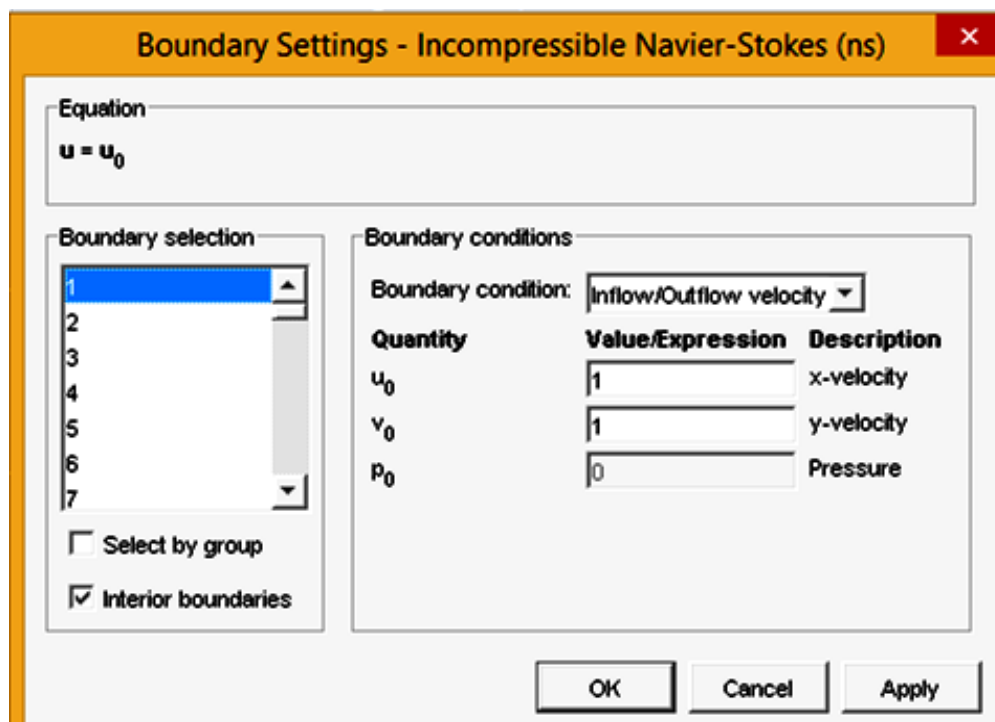


Рис.3.4. Вікно Boundary Settings

3.1.5. Завдання межових умов і зміна диференційних рівнянь

Межові умови задаються через **Physics>Boundary Settings**. В вікні **Boundary selection**, рис.3.4, слід обрати необхідні межі і поля, а у опції **Boundary conditions** вказати межові умови того роду, який застосовується. В полі **Equations** буде виведено відповідне межовій умові її рівняння.

3.1.6. Побудова сітки

Після завдання усіх фізичних властивостей і вибору межових умов будується трикутна сітка (з трьохмірних комірок). У першому наближенні оціночного розрахунку доцільно обирати сітку по умовчанням **Mesh>Initialize Mesh** (або кнопка з зображенням трикутника) і декілька разів натиснути **Mesh>Refine mesh** і отримати достатньо мелку сітку розпочати рішення задачі.

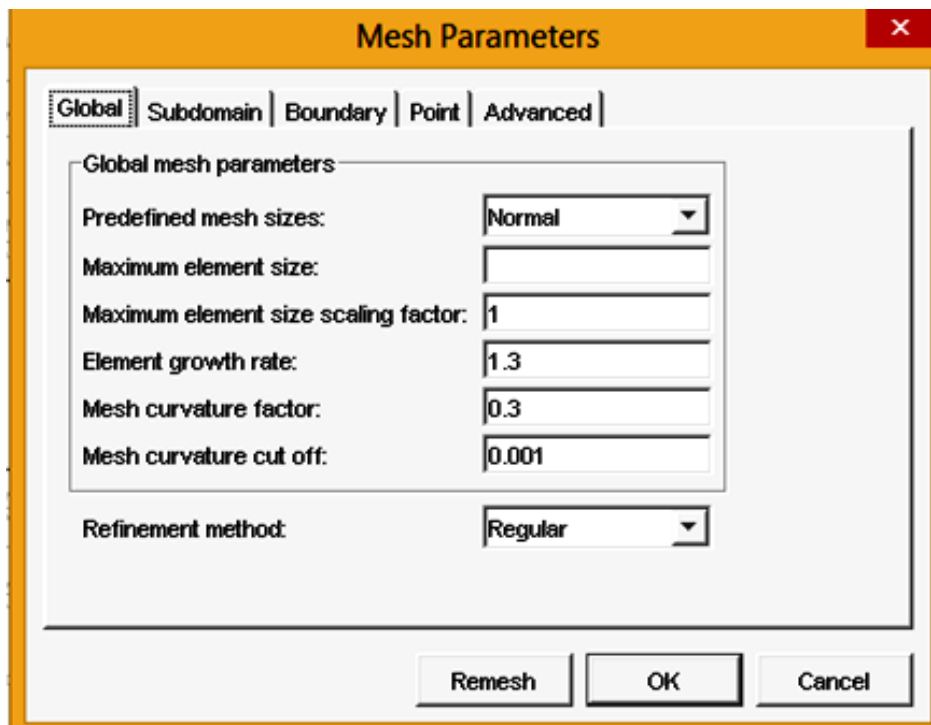


Рис.3.5. Вікно Mesh parameters

Якщо стоїть позначка **Auto Select solver**, це означає що програма у залежності від прикладного режиму підбрала найбільш зручний вирішувач. Для нескладних обчислень міняти його не треба.

3.1.8. Візуалізація результатів розрахунку

Після вдалого завершення розрахунку автоматично вмикається режим **Postprocessing mode [Режим постобробки]** в якому можна спостерігати результати обчислень. На зображенні об'єкта розрахунку будується поле швидкостей повітря тощо. У випадку **2D** задачі режим постобробки наступний. Опція **Surface Plot** виводить значення скалярного потенціала - швидкості. Опція **Contour Plot** виводить рішення у вигляді ізоліній. Опція **Arrow** виводить векторне поле швидкостей за допомогою стрілочок. Опція **Streamline plot** виводить векторне поле у вигляді ліній потоку тощо.

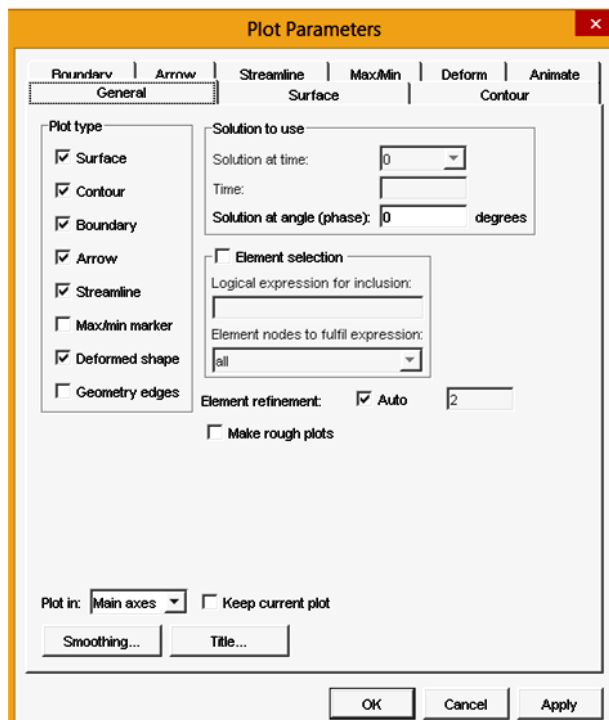


Рис.3.6. Вікно Plot Parameters

4. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ПОВІТРЯ У ВІДСІКУ ВИПАРНИКА

Під моделюванням вважатимемо застосування методу чисельного дослідження фізичного явища руху повітря у визначеному геометричному об'ємі і накладених на нього межових умовах та на підставі його диференційних рівнянь балансу маси речовини, імпульсу сили.

Метою роботи є визначення межових значень швидкості і тиску повітря на виході після випарника холодильної машини рефрижераторного контейнера та такого, який, розташовано у металевому кожусі із звуженням перерізу вихідного отвору і оснащено системою примусової подачі повітря від вентилятора, що приводиться у дію двошвидкісним однофазним асинхронним двигуном. Із наведеного на рис. 4.1 пристрою випарника витікає, що повітря під дією примусової конвекції, утвореної вентилятором, обтікає встановлену під кутом до напрямку руху повітря поверхню випарника і проходить в каналі звуження (прискорювача) де його швидкість і тиск зростають.



Рис. 4.1. Пристрій випарника холодильної машини оснащеного вентилятором

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

Отже, швидкість руху повітря у корисному об'ємі холодильної шафи рефрижераторного контейнера із об'єктами тимчасового утримання, є залежними від початкових значень швидкості повітря і його тиску на виході випарника, а також від продуктивності двигуна вентилятора. До того ж розподіл поля температур у холодильній шафі також визначається із урахуванням поля швидкостей повітря. Для розрахунку межових значень швидкості і тиску повітря на виході після пристрою випарника холодильної машини рефрижераторного контейнера застосовано програмне забезпечення COMSOL Multiphysics Femlab 3.0 в його частині Fluid Dynamics - Incompressible Navier-Stokes.

При розрахунку механіки повітря у динаміці або статиці припускаємо, що його щільність є незмінною чи майже незмінною. У підсумку матимемо нестисливий потік, який припускає застосування рівнянь Нав'є – Стокса.

Змінні і розмірність моделі. Вирішення рівнянь Нав'є – Стокса дозволяє визначити тиск і складові вектора швидкості повітря у просторі геометричних розмірів моделі за рівнянням його потоку (4) в якому: $\eta = 2.56e-5 (kg/ms)$ - динамічна в'язкість, яка встановлює зв'язок між зсувними напруженнями в повітрі до швидкості зсуву; $\rho = 0.66 (kg/m^3)$ - щільність, як властивість повітря; \vec{v} - вектор поля швидкості або його складові по осях, які залежать від розмірів геометричної моделі; $p (Pa)$ - тиск; F - масове зусилля, яке визначає розподіл силового поля – гравітаційного [1,2].

4.1. Моделювання пристрою випарника

Моделювання задачі починається з формування межових умов однозначності: геометричних, якими задається форма і розміри об'єкту в якому здійснюється процес; фізичних, якими встановлюються такі теплофізичні параметри середовища як щільність, в'язкість; крайових,

якими встановлюються початкові значення швидкості, тиску на окремих межах або у середовищі. В задачі, що вирішується застосовані межові

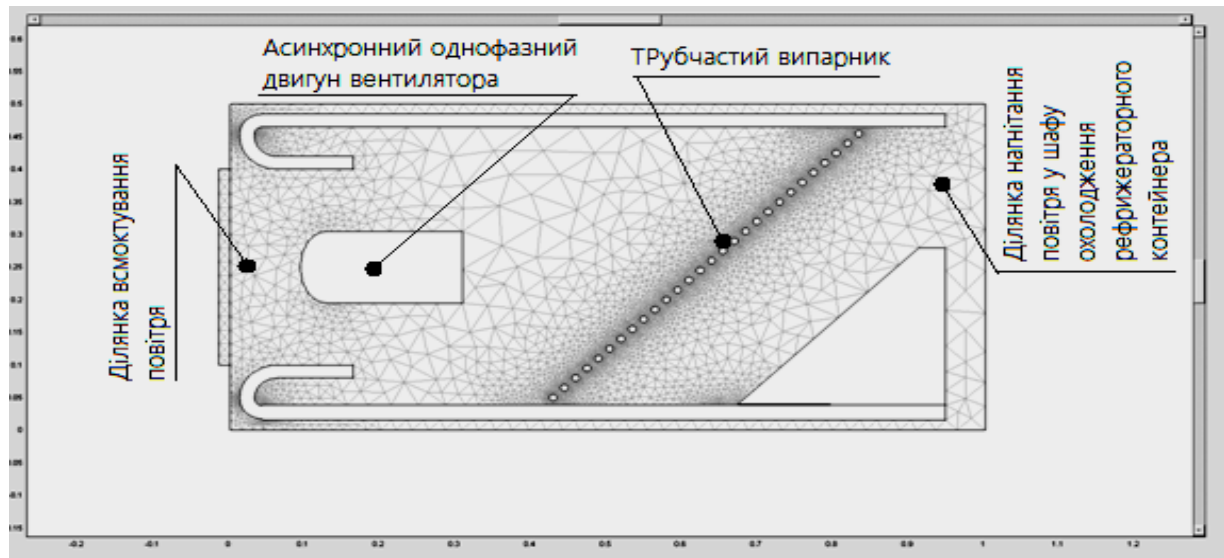


Рис. 4.2. Розрахункова модель випарника холодильної машини оснащеного вентилятором

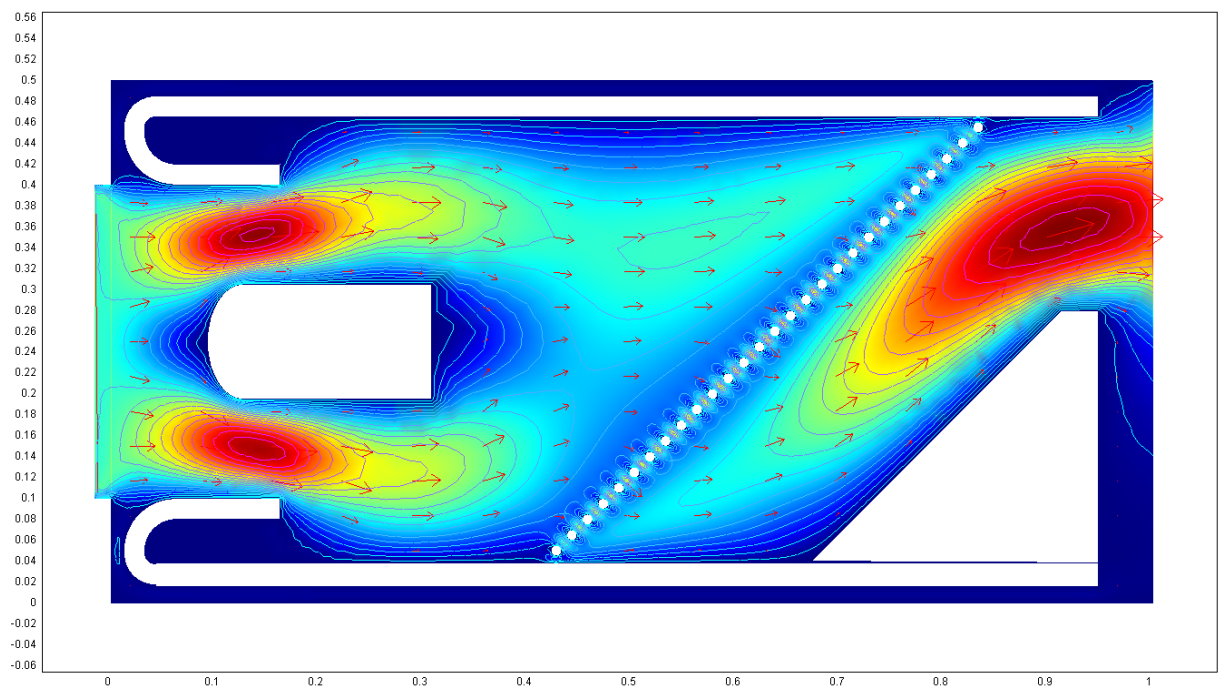


Рис. 4.3. Результати розрахунку поля швидкості повітря в пристрою трубчастого випарника холодильної установки із вентилятором

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

умови першого і другого роду. Загальний вигляд геометрії області розрахунку в якому диференційне рівняння Нав'є – Стокса дозволяє визначити поле швидкості у будь-якій точці, є поділений на елементарні комірки в яких диференційне рівняння замінено його кінцево-різничним аналогом (алгебраїчним рівнянням), рис. 4.2, та таким в якому враховані геометричні розміри комірки та фізичні властивості їх середовища.

Отже алгебраїзація рівняння утворює замість одного рівняння Нав'є – Стокса матрицю рівнянь, розмір якої у двомірній постановці задачі дорівнює кількості комірок у квадраті.

4.2. Результати розрахунку швидкості повітря у відсіку випарника

На рис. 4.3 наведено результати розрахунку поля швидкостей повітря, що обтікає зовнішню поверхню випарника холодильної установки встановлену по відношенню до вентилятора примусової конвекції під кутом 45° .

На рис. 4.4, 4.5 і 4.6 наведені графіки розподілу швидкості повітря до, вздовж і після проходження ним випарника, розташованого під кутом 45° до вісі вентилятора, отримані шляхом моделювання в програмному середовищі Femlab 3.0, а саме в Fluid Dynamics - Incompressible Navier-Stokes.

На рис. 4.7 наведено аналогічний графік швидкості повітря на ділянці всмоктування його до випарника вентилятором.

Із урахуванням мети роботи – визначити межові умови на виході з випарника, на рис.4.8 наведено графік швидкості повітря, що подається до входу у шафу охолодження рефрижераторного контейнера і залежить від умов зміни продуктивності вентилятора та температури зовнішнього середовища.

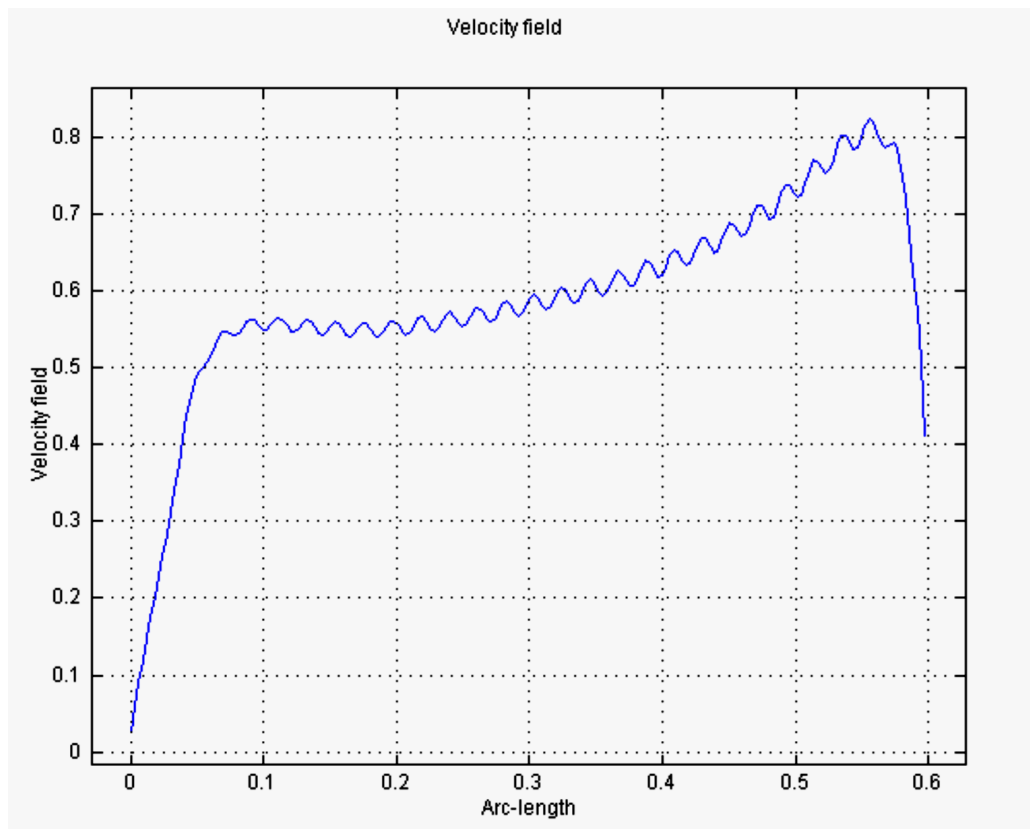


Рис. 4.4. Графіки зміни швидкості повітря до проходження ним випарника

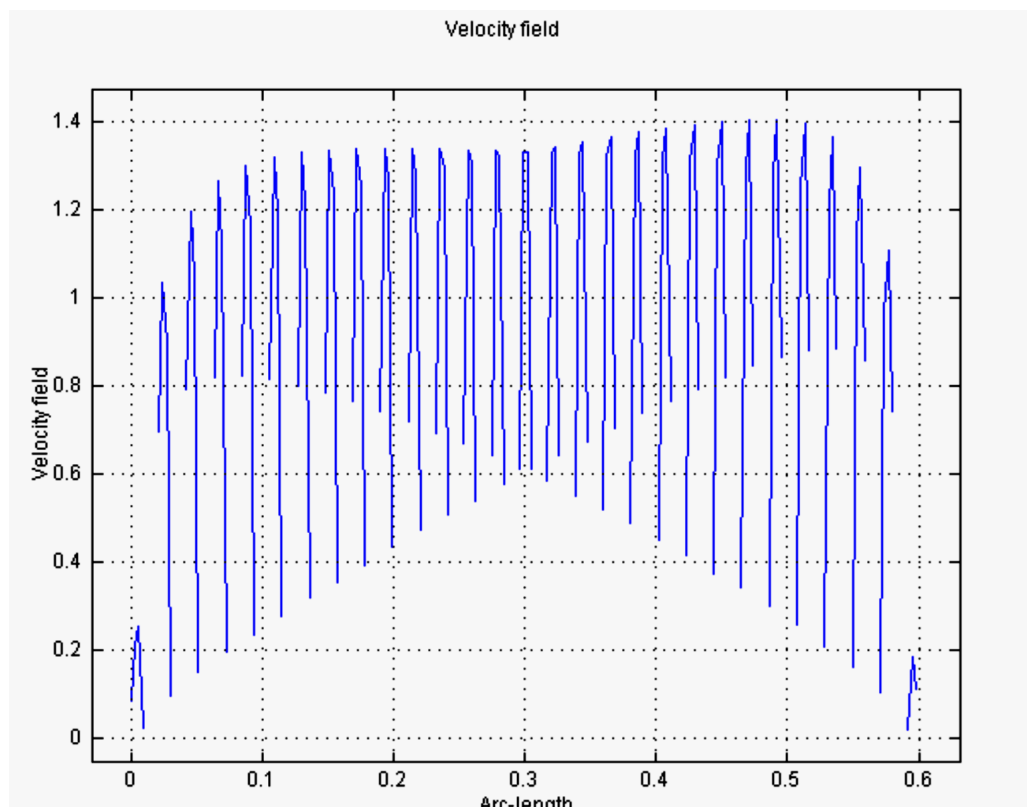


Рис. 4.5. Графіки зміни швидкості повітря вздовж перерізу трубок випарника

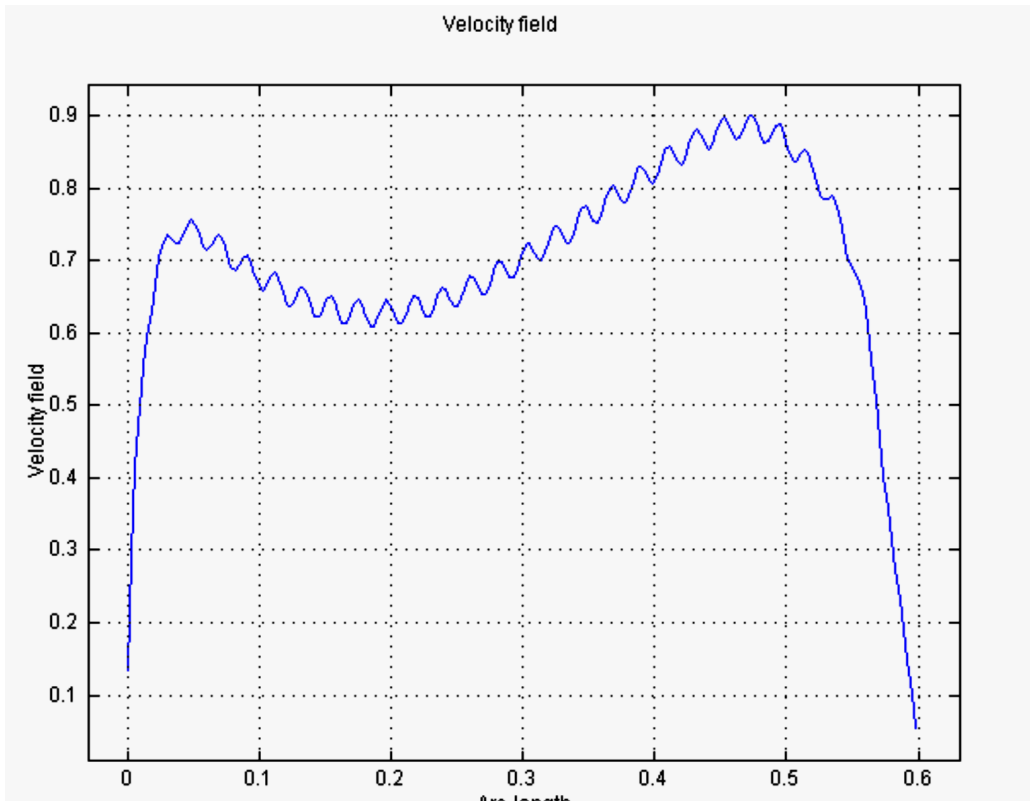


Рис. 4.6. Графіки зміни швидкості повітря після проходження ним випарника

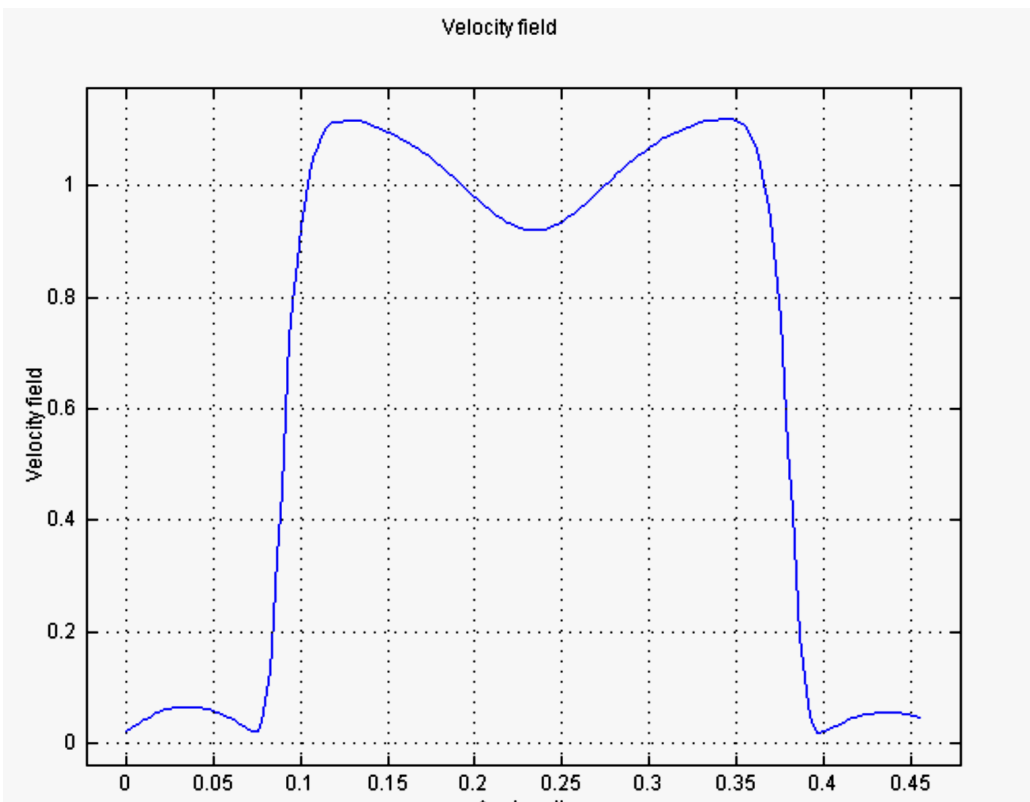


Рис. 4.7. Графік зміни швидкості повітря на виході з шафи охолодження і вході до випарника

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

об'ємі шафи охолодження рефрижераторного контейнера і, на їх підставі, поля температур.

2. Наведено, що вектор швидкості повітря на вході до шафи охолодження рефрижераторного контейнера нерівномірний вздовж межі та має характер параболи, що є важливим при моделюванні поля швидкості у самому рефрижераторі.

3. Результати моделювання поля швидкості повітря на виході з пристрою випарника дозволяють більш ретельно підійти до вибору типу, потужності, ефективної продуктивності асинхронного електродвигуна приводу його вентилятора та у залежності від побудови повітряного кожуху і вибору форми вихідного сопла.

					ДП ЕН-141а 2.23	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		59

5. РОЗРАХУНОК ШВИДКОСТІ ПОВІТРЯ В ХОЛОДИЛЬНІЙ КАМЕРІ РЕФРИЖЕРАТОРНОГО КОНТЕЙНЕРА

На рис. 5.1 наведено загальний вид холодильної установки (приєднана ліворуч) і рефрижераторного контейнера TEU-20 (камера праворуч), в якому здійснюється теплообмін примусовою конвекцією.

Замкнений цикл обертання повітря між випарником холодильної машини і об'єктом охолодження у камері та навпаки забезпечується дією вентиляторів, що обдувають поверхню випарника, утворюючи тим тиск повітря на виході із звуженого коробчастого каналу унизу камери, та всмоктує його з камери охолодження під стелею. Отже стан руху повітря у камері охолодження не стаціонарний, та такий, що залежить від межових умов обумовлених лінійними розмірами камери та від обраного розміщення в неї об'єктів охолодження. Оскільки розподіл поля температури у камері є залежним від швидкості розподілу повітря, то розрахунок її значень потребує попереднього розрахунку поля швидкості повітря.

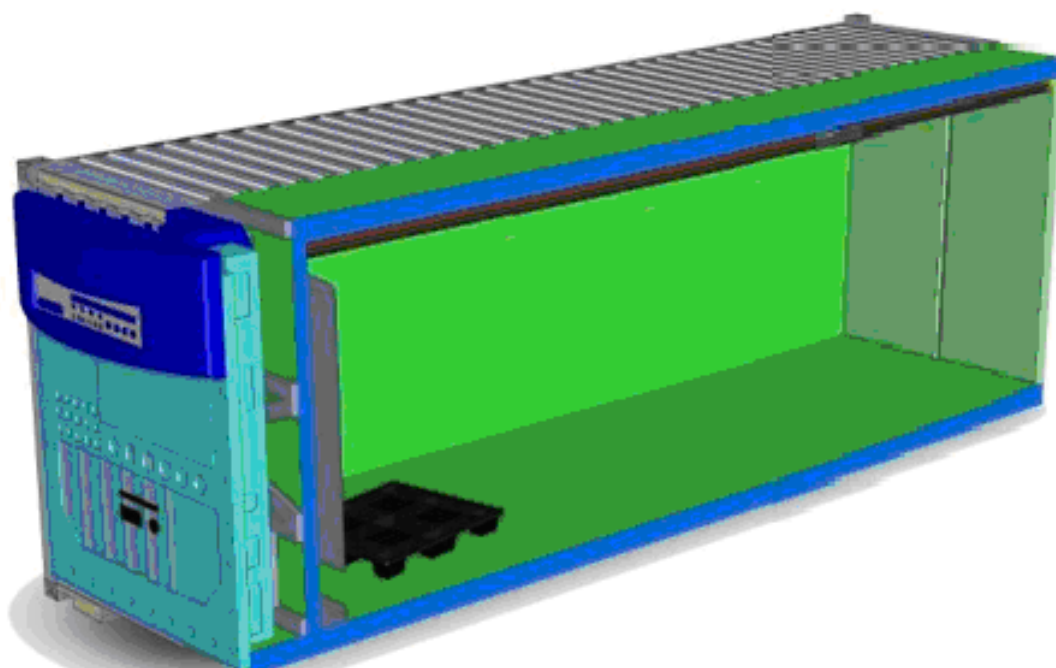


Рис. 5.1. Холодильна установка (ліворуч) у зборі з рефрижераторним контейнером

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

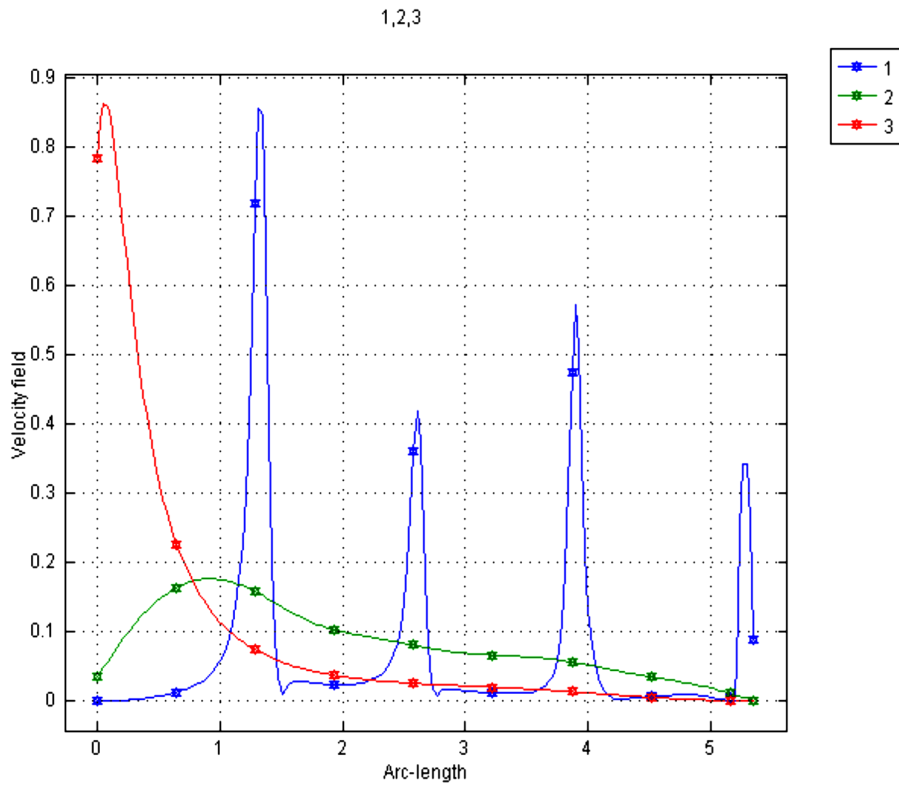


Рис. 5.3. Графік розподілу швидкості повітря вздовж довжини контейнера на висоті від підлоги 0,1; 1,16; 2,24 метри (позначки 1,2 і 3 відповідно)

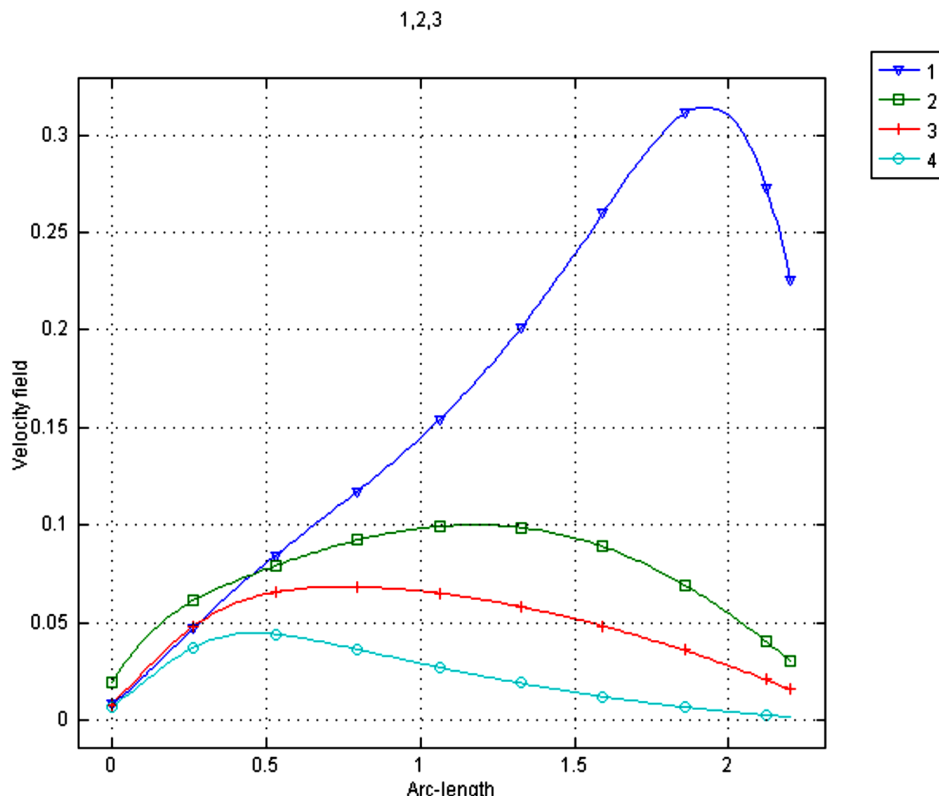


Рис. 5.4. Графік розподілу швидкості повітря вздовж висоти контейнера на відстані від холодильної установки 1,6; 3; 4,4; 5,8 метри (позначки 4,3,2,1 відповідно)

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

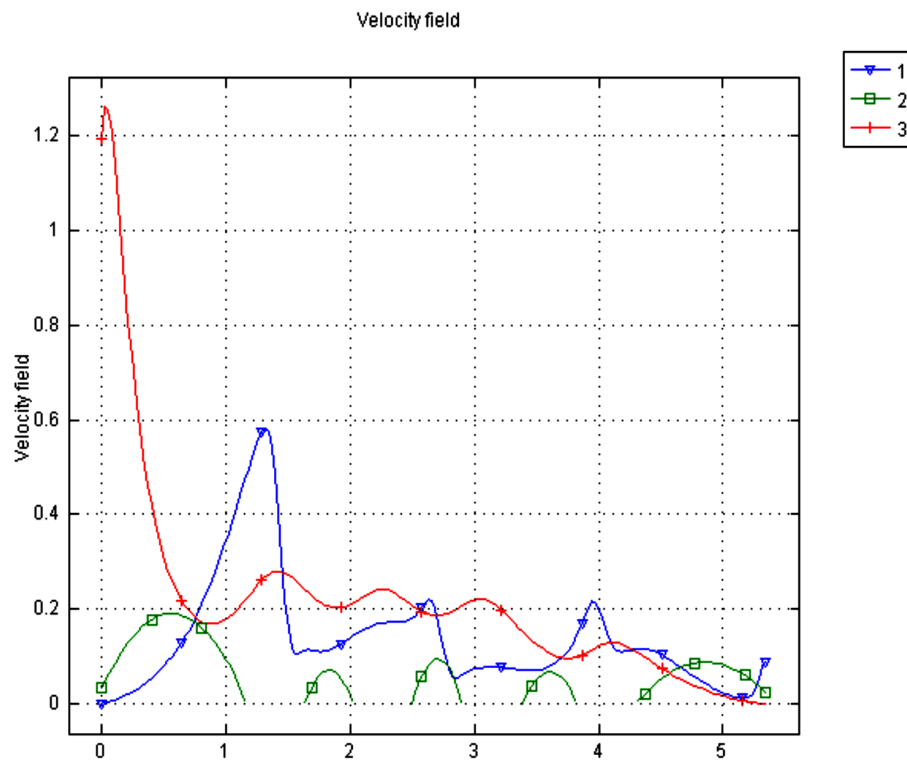


Рис. 5.6. Графік розподілу швидкості повітря вздовж довжини завантаженого контейнера на висоті від підлоги 0,1; 1,16; 2,24 метри (позначки 1,2 і 3 відповідно)

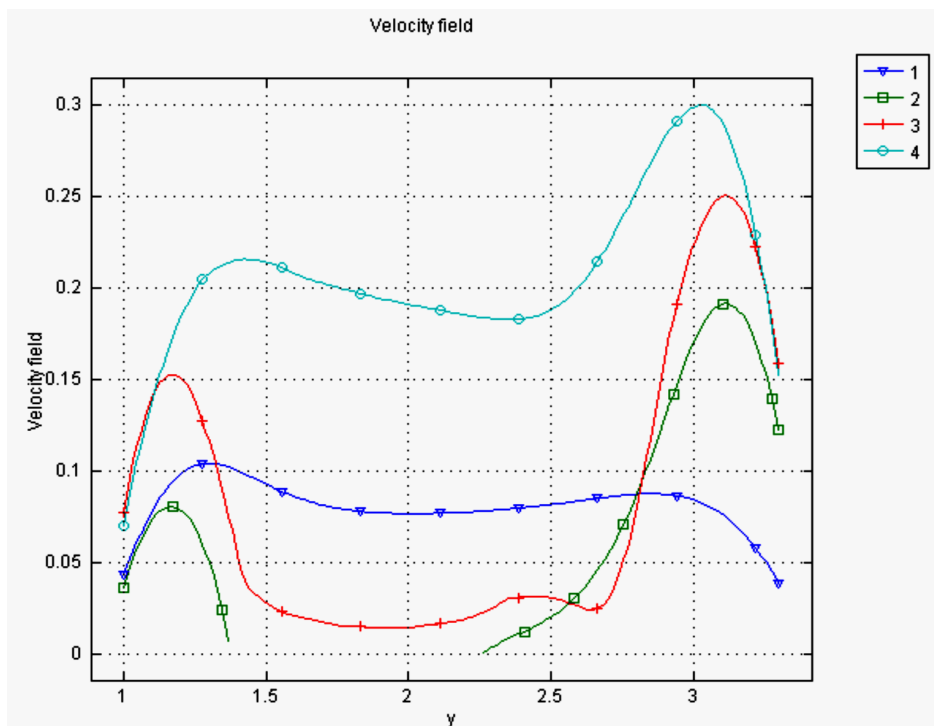


Рис. 5.7. Графік розподілу швидкості повітря вздовж висоти завантаженого контейнера на відстані від холодильної установки 1,6; 3; 4,4; 5,8 метри (позначки 4,3,2,1 відповідно)

Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

Висновки до розділу 5

1. Апробовано алгоритм і метод комплексного розрахунку польових задач - швидкості повітря всередині рефрижераторного контейнера, який є базовим при вирішенні проблеми із визначення продуктивності холодильної машини і встановлення будь-якого закону управління її роботою, енергетичної ефективності холодильної установки за непрямим методом – по показникам температури та енергоспоживанню, тощо [5].

2. Наступним кроком, щодо удосконалення наведеного рішення задачі, є вирішення нестационарної задачі процесу охолодження швидкопсувних продуктів – у часі та у 3D зображенні [9,10].

					ДП ЕН-141а 2.23	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		65

6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

6.1. Класифікація приміщення по ступеню небезпеки поразки 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 $+35^{\circ}\text{C}$; такі приміщення називаються жаркими;
- струмопровідного пилу, коли за умов виробництва в приміщеннях виділяється струмопровідний технологічний пил, в такій кількості, що він осідає на дротах, проникає всередину машин, апаратів 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 2.23	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		66

4.2. Розрахунок заземлення із застосуванням програмного середовища

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

Рис.6.1. Робоче вікно програмного продукту «ЗАЗЕМЛЕНИЕ»

На рис.6.1. 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.6.1 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;
- Розточення заземлювачів може здійснюватись або замкнено у контур, або у ряд. Зазвичай обирається контур;
- Матеріал для виготовлення обв'язки горизонтального заземлювача (смуга або пруток);
- 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.4.2.

					ДП ЕН-141а 2.23	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		68

Методика розрахунку заземлення.

1.Сопротивление 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

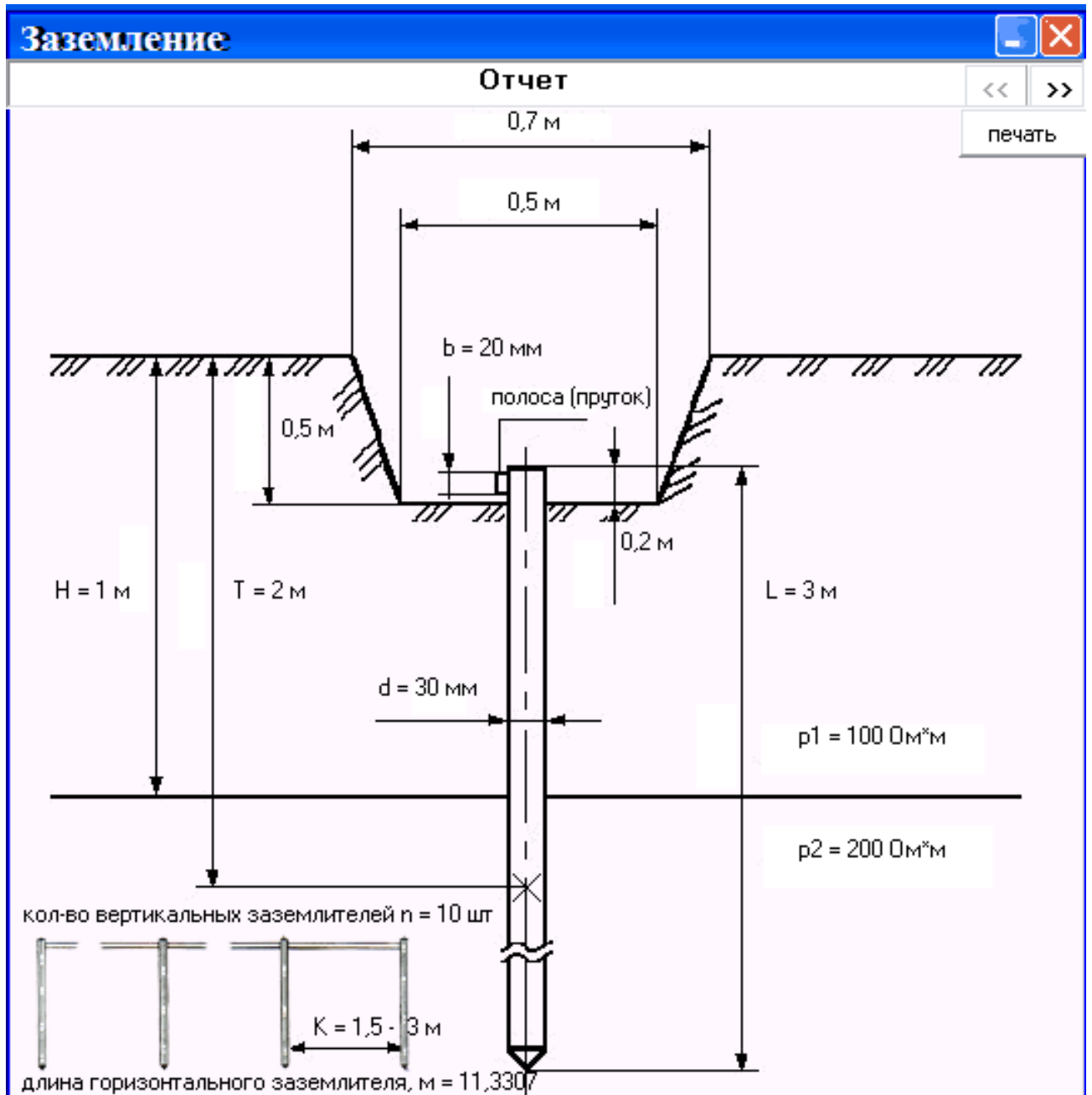


Рис.6.4. Ескіз захисного заземлення

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

$$R_B = R_{\Pi} R_H / (R_{\Pi} + R_H)$$

7.Количество вертикальных заземлителей шт

$$n = R_0 / R_B h_c$$

Висновки до розділу 6

1. Результати розрахунку захисного заземлення виконані за прийнятою методикою у програмному середовищі «ЗАЗЕМЛЕНИЕ» наведені на рис.6.4.
2. Застосування програмного продукту значно спрощує процедуру розрахунків і забезпечує розробника повною інформацією щодо його улаштування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Вирішення задачі гідродинаміки є складним але важливим етапом при проектуванні рефрижераторних контейнерів на початку розрахунку теплообміну конвекцією, не визиває сумніву.

2. Вихідні дані щодо предмету дослідження і об'єкту є достатніми, для стаціонарного рефрижераторного контейнера TEU-20.

3. Недостатня технічна інформація по рефрижераторним контейнерам 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 гідродинаміки (Нав'є-Стокса), в середині об'єму камер і випарників промислових холодильників і у тому числі рефрижераторних контейнерів, яка дозволяє суттєво вплинути на точність отриманих результатів під час їх проектування. Така підсистема надасть можливість чисельного вивчення роботи холодильника, чим скоротить час для прийняття рішення стосовно керування його продуктивністю під час застосування за місцем призначення.

5. Викладена в роботі математична модель рівняння Нав'є-Стокса та така, яку закладено у програмному середовищі COMSOL Multiphysics в розділі Fluid Dynamics, дозволила виконати моделювання рефрижераторного контейнера за методом кінцевих елементів, здійснити розрахунки поля швидкості прмусового руху повітря як на ділянці випарника так і в корисному об'ємі холодильної камери та по штучних каналах в підлозі. Розрахунки виконано для двох випадків - без завантаження і при завантаженні камери. За даними розрахунків можна встановити ділянки камери де рух повітря уповільнений і тому вони

					ДП ЕН-141а 2.23	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		72

вимагають штучного підсилення - переобладнанням повітряних каналів під підлогою.

6. Апробований метод є корисним при вирішенні задачі конвекції і теплопровідності Пуассона в якій розрахунок поля температури залежить від швидкості примусового руху повітря.

ЛІТЕРАТУРА

1. Стандарт ISO 830-1981 «Вантажні контейнери - Термінологія»
<http://www.transportir.ru/>
2. Стандарт ISO 1496/1
3. ДСТУ 20259-80 «Контейнери універсальні».
4. ДСТУТ 18477-79 «Контейнери універсальні. Типи, основні параметри і розміри»
5. ISO 668, 1161
6. ISO 1496/1.
7. ИСО 886, Серія 1. Вантажні контейнери – класифікація, зовнішні розміри і номінальні параметри.
8. ИСО 1894: Вантажні контейнери 1 серії загального призначення. Мінімальні внутрішні розміри.
9. ИСО 6348: Вантажні контейнери – кодування, позначення та маркування
10. Carrier Transicold Division, Carrier Corporation P.O. Box 4805 Syracuse, N.Y. 13221 U.S A www.carrier.Transicold.com
11. Керівництво з експлуатації і технічного обслуговуванню холодильних агрегатів Carrier моделей 69 NT40-489. –
<http://container.ru/about/refcontainer/page/alias=ref4>

					ДП ЕН-141а 2.23	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		73

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

					ДП ЕН-141а 2.24ДП ЕН-141а 2.23	Лист
Змін.	Лист	№ докум. Н.	Підпис	Дата		75

ДОДАТОК
Файли презентації

					ДП ЕН-141а 2.23	Лист
Змін.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		75