

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С.Гулого
Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

«До захисту в ЕК»

Директор інституту

_____ Сергій Блаженко
(підпис) (ім'я та прізвище)

« ____ » _____ 2023 р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Валентин Петренко
(підпис) (ім'я та прізвище)

« ____ » _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 142 Енергетичне машинобудування

(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми Холодильні техніка та технологія

на тему: Аналіз методів розрахунку процесу заморожування зеленого горошку в флюїдизаційному швидкокоморозильному апараті

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ХМ-2-8М

_____ Ніколаєць Дмитро Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

(підпис)

Керівник _____ Масліков Максим Михайлович

(прізвище, ім'я)

(підпис)

Консультант _____

(прізвище, ім'я)

(підпис)

Рецензент _____

(прізвище, ім'я)

(підпис)

Я як здобувач Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідні джерела.

(підпис та прізвище здобувача)

Київ – 2023 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім.акад. І.С.Гулого
Кафедра теплоенергетики та холодильної техніки

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 142 Енергетичне машинобудування
(код і назва)

Освітньо-професійна програма Холодильні техніка та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТЕХТ

Валентин ПЕТРЕНКО

“20” листопада 2023 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Ніколайця Дмитра Миколайовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз методів розрахунку процесу заморожування зеленого горошку в флюїдизаційному швидкоморозильному апараті керівник роботи доц. М.М. Масліков.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від 20.11.2023 року № 940-кс

2. Строк подання здобувачем роботи 09.02.2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Застосування існуючих методологій розрахунку флюїдизаційного швидкоморозильного апарату з паралельним аналізом отриманих результатів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Для розрахунку поставлені такі задачі: визначити оптимальну швидкість руху повітря, визначити тривалість заморожування, габаритні розміри апарату, коефіцієнт тепловіддачі, об'ємна витрата повітря, теплове навантаження, кількість повітроохолоджувачів. Порівняння коефіцієнтів тепловіддачі отриманих за різних методів розрахунку.

5. Перелік графічного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 20.11.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на кваліфікаційну роботу (проект)	20.11-24.11.2023	
2	Виконання розділів кваліфікаційної роботи (проекту)	24.11.2023 - 29.01.2024	
3	Оформлення ПЗ, презентації, консультації з розділів	29.01- 05.02.2024	
4	Подача роботи на перевірку тексту кваліфікаційної роботи на академічний плагіат	05.02 -09.02.2024	

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

Дмитро НІКОЛАЄЦЬ
(прізвище та ініціали)

Максим МАСЛІКОВ
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В магістерській роботі представлено розробку швидкоморозильного флюїдизайного апарату для заморожування горошку. Продуктивність апарату складає $500 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$. Було проведено наступне:

- Розраховано оптимальну швидкість руху повітря для псевдозрідженого шару
- Визначено тривалість заморожування
- Габаритні розміри апарату
- Досліджено зміну коефіцієнту тепловіддачі за різних розрахункових методологій
- Підібрано основне обладнання

Ключові слова: флюїдизаційний апарат, розрахунок заморожування горошку, одноступенева холодильна машина, швидкоморозильні апарати флюїдизайного типу, розрахунок обтікання кулі у псевдозрідженому шарі, основні типи ШМА, швидке заморожування харчових продуктів, заморожування горошку у псевдозрідженому шарі, розрахунок ШМА.

					<i>КР 000.142.003.006.2024.РПЗ</i>		
		№ докум.	Підпис				
Розробив	<i>Д.М. Ніколасць</i>			Аналіз методів розрахунку процесу заморожування зеленого горошку в флюїдизаційному швидкоморозильному апараті	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	<i>М.М. Масліков</i>					1	40
Реценз.					<i>TEXT HНІТІ НУХТ</i>		
Н. контр.							
Затверд.	<i>М.О. Прядко</i>						

ABSTRACT

The master's thesis presents the development of a fluidized-bed rapid freezing apparatus for freezing peas. The productivity of the apparatus is 500 kg per hour. The following tasks were completed:

Calculated the optimal air velocity for fluidized bed formation

Determined the freezing time

Established the dimensions of the apparatus

Investigated changes in the heat transfer coefficient using different calculation methodologies

Selected the main equipment

Keywords: fluidized-bed apparatus, freezing calculation for peas, single-stage refrigeration machine, fluidized-type rapid freezing apparatus, calculation of sphere fluidized bed flow, main types of freezing machines, rapid freezing of food products, freezing peas in a fluidized bed, freezing machine calculation.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	1
1. ВСТУП	3
2. Швидкоморозильні апарати. Огляд основних типів.....	4
3. Розрахунок ШМА флюїдизаційного типу безперервної дії	7
4. Вибір типу холодильної машини та розрахунок циклу	29
5. Розрахунок трубопроводів	35
Використані джерела.....	40

					<i>КР 000.142.003.006.2024.РПЗ</i>		
		№ докум.	Підпис				
Розробив	<i>Д.М. Ніколаєць</i>			Аналіз методів розрахунку процесу заморожування зеленого горошку в флюїдизаційному швидкоморозильному апараті	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	<i>М.М. Масліков</i>					2	40
Реценз.					<i>TEXT HНІТІ НУХТ</i>		
Н. контр.							
Затверд.	<i>М.О. Прядко</i>						

1. ВСТУП

В Україні розвивається неймовірно швидко переробна промисловість сільськогосподарського сектору. Вже сьогодні Україна успішно переробляє сировину, а саме заморожує різні овочі, фрукти та ягоди. Якісно побудований холодильний ланцюг забезпечує мінімальні капітовкладення в одиницю товару.

За даними [6] академік НААН Микола Пугачов повідомляє, що в 2021 році Україна експортувала лише заморожених ягід та інших фруктів – близько 76 тис. т. І ці цифри зростають з кожним роком. Можна сказати, що заморожені фрукти та ягоди стають «трендом». Оскільки, споживачі все більше та більше починають у зимовий період споживати заморожені фрукти, овочі та ягоди.

Тому, нам як, фаховим спеціалістам необхідно забезпечити ці процеси для пришвидшення економічному зростанню нашої країни.

Надважливим, є забезпечення якісного заморожування продукції, оскільки якість заморожування впливає на смакові показники вихідного продукту.

					<i>КР 000.142.003.006.2024.РПЗ</i>		
		№ докум.	Підпис				
Розробив	<i>Д.М. Ніколаєць</i>			Аналіз методів розрахунку процесу заморожування зеленого горошку в флюїдизаційному швидкокоморозильному апараті	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	<i>М.М. Масліков</i>					3	40
Реценз.					<i>ТЕХТ ННІТІ НУХТ</i>		
Н. контр.							
Затверд.	<i>М.О. Прядко</i>						

2. Швидкоморозильні апарати. Огляд основних типів

Морозильні апарати, можливо розділити на наступні основні типи:

- ШМА з інтенсивним рухом повітря;
- Плиткові ШМА;
- Контактні ШМА, у яких продукт заморожується при безпосередньому контакті з рідким холодильним агентом або холодоносієм.

Морозильні апарати з інтенсивним рухом повітря

Серед ШМА, де в якості теплоносія використовується газ (діоксид вуглецю, повітря), найбільше поширення отримали пристрої з інтенсивним рухом повітря. Розглянемо типи та конструкції основних ШМА з інтенсивним рухом повітря

Тунельні швидкозаморожувальні апарати працюють безперервно. Швидке заморожування досягається впливом охолодженого повітря, що рухається вздовж продукту з великою швидкістю, температура залежить від технології.

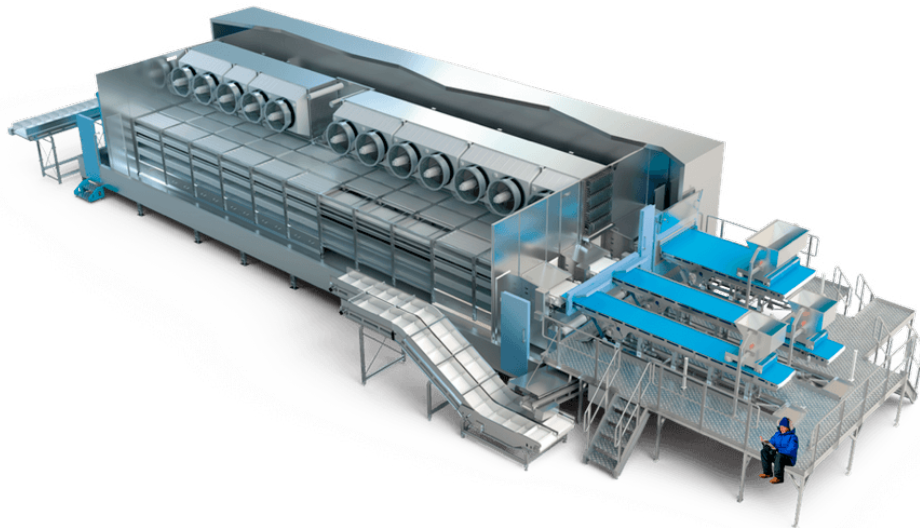


Рис. 1.1 ШМА тунельного типу

Тележечні швидкозаморожувальні апарати (Див. Рис. 1.2) у конструктивному плані майже не відрізняються від збірних низькотемпературних камер. Основна відмінність швидкість руху повітря у камері.

				<i>КР 000.142.003.006.2024.РПЗ</i>			
		№ докум.	Підпис				
Розробив	<i>Д.М. Ніколасць</i>			Аналіз методів розрахунку процесу заморожування зеленого горошку в флюїдизаційному швидкоморозильному апараті	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	<i>М.М. Масліков</i>					4	40
Реценз.					<i>ТЕХТ ННІТІ НУХТ</i>		
Н. контр.							
Затверд.	<i>М.О. Прядко</i>						

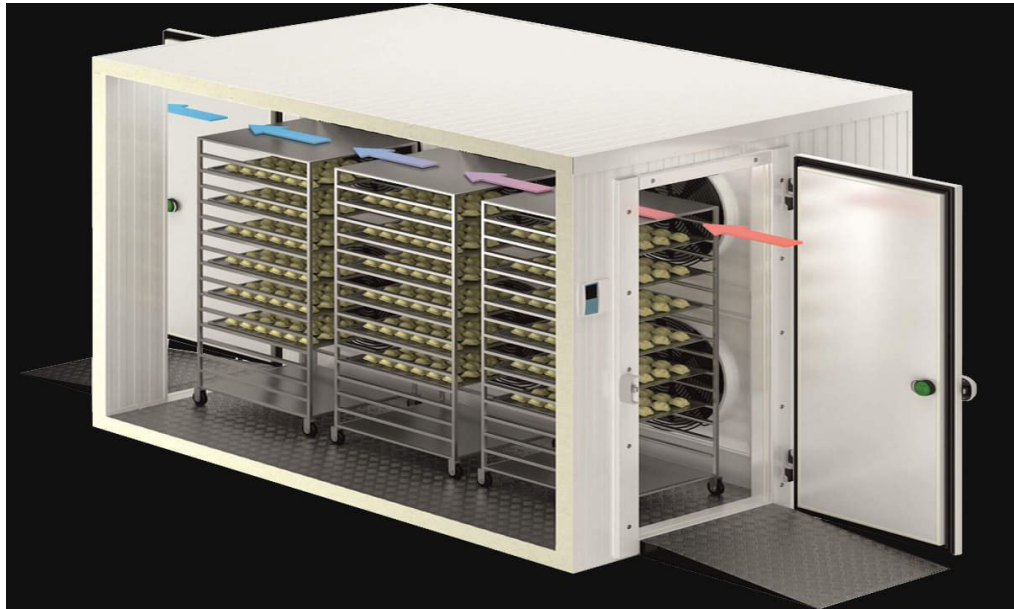


Рис. 1.2 Низькотемпературна камера тунельного типу

Плиткові швидкозаморожувальні апарати значно підвищують продуктивність та зменшують собівартість виробленого продукту, що дозволяє зробити продукт більш конкурентоспроможним і прибутковим.

Плиткові швидкозаморожувальні апарати мають найбільшу продуктивність порівняно з ШМА, де використовується висока швидкість повітря, це досягається за рахунок того, що продукт знаходиться під прямим контактом з поверхнею теплообмінника.

Контактні морозильні апарати

У системах охолодження без використання холодильних машин найбільш поширеним робочим середовищем є рідкий азот (N₂).

Швидкозаморожувальний апарат з такою системою охолодження працює за проточним принципом дії, що передбачає одноразове використання кріоагента.

Однією з головних переваг кріогенної проточної системи є те, що джерело холоду (N₂) знаходиться у безпосередньому контакті з продуктом. Крім того, щільний контакт між кріоагентом і продуктом дозволяє фіксувати його рівень вологості, що зменшує втрати маси продукту через висихання, покращує його якість і товарний вигляд.

					<i>КР 000.142.003.006.2024.РПЗ</i>	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

Заморожування продукту кріогенним методом дозволяє забезпечити високу швидкість процесу та забезпечити довготривале та якісне зберігання продукції

					<i>КР 000.142.003.006.2024.РПЗ</i>	Арк
						6
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

3. Розрахунок ШМА флюїдизаційного типу безперервної дії

Для розрахунку поставлені такі задачі: визначити оптимальну швидкість руху повітря, визначити тривалість заморожування, габаритні розміри апарату, коефіцієнт тепловіддачі, об'ємна витрата повітря, теплове навантаження, кількість повітроохолоджувачів. Порівняння коефіцієнтів тепловіддачі отриманих за різних методів розрахунку.

Вхідні дані:

Продукт — горошок зелений

Температура повітря в апараті: $t_{\text{пм}} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$

Температура кипіння: $t_0 = -40 \text{ }^\circ\text{C}$

Температура продукту початкова: $t_{\text{поч}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$

Температура продукту кінцева: $t_{\text{кін}} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$

Продуктивність: $G = 500 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$

Початкову швидкість флюїдизації (псевдорозрідження) потрібно розраховувати для найбільшого за розмірами одиничного горошку. Отже, розрахунок проводимо за наступною формулою:

$$w_{\phi} := \frac{\nu_{\text{пов}} \cdot Ar}{d_{\text{ев}} \cdot (1400 + 5.22 \cdot Ar^{0.5})} \quad (3.1), \text{ де}$$

$$Ar := \frac{9.81 \cdot d_{\text{ев}}^3 \cdot \rho_{\text{пр}}}{(\nu_{\text{пов}})^2 \cdot \rho_{\text{пов}}} - \text{число Архімеда;}$$

$$d_{\text{ев}} := 9 \cdot 10^{-3} \text{ м} - \text{діаметр найбільшого горошку (довідникове значення), м;}$$

$$\nu_{\text{пов}} := 10.8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}} - \text{кінематична в'язкість повітря, м}^2/\text{с}$$

$$\rho_{\text{пр}} := 970 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} - \text{щільність продукту (довідникове значення), кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{пов}} := 1.484 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} - \text{щільність повітря, кг/м}^3$$

					<i>KP 000.142.003.006.2024.P13</i>	Арк
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розраховуємо число Архімеда та визначаємо початкову швидкість флюїдизації

$$Ar := \frac{9.81 \cdot d_{ев}^3 \cdot \rho_{пр}}{(\nu_{пов})^2 \cdot \rho_{пов}} = 4.008 \times 10^7 \quad (3.2)$$

$$w_{\phi} := \frac{\nu_{пов} \cdot Ar}{d_{ев} \cdot (1400 + 5.22 \cdot Ar^{0.5})} = 1.396 \cdot \frac{м}{с} \quad (3.3)$$

Швидкість виносу продукції необхідно визначати за діаметром найбільш меншого одиничного продукту. У нашому випадку такий діаметр горошку складає 7 мм.

Виконуємо перерахунок числа Архімеда

$$Ar := \frac{9.81 \cdot d_{ен}^3 \cdot \rho_{пр}}{(\nu_{пов})^2 \cdot \rho_{пов}} = 1.886 \times 10^7$$

$$w_{виносу} := \frac{\nu_{пов} \cdot Ar}{d_{ен} \cdot (18 + 0.6 \cdot Ar^{0.5})} = 11.089 \cdot \frac{м}{с}$$

Де, $d_{ен} := 7 \cdot 10^{-3} \cdot м$ - діаметр найменшого горошку (довідникове значення), м;

Отже, оптимальна швидкість у вантажному відділенні флюїдизаційного апарату є:

$$w_0 := 3 \cdot w_{\phi} = 4.188 \cdot \frac{м}{с}$$

$$Q_2 := G \cdot [c_H \cdot (t_{поч} - t_{кр}) + w \cdot \omega \cdot r + c_3 \cdot (t_{кр} - t_{кін})]$$

$\omega := 1 - \frac{t_{кр}}{t_{кін}}$ - частка вимороженої вологи з продукції;

$r := 335 \cdot \frac{кДж}{кг \cdot К}$ - теплота льодоутворення для горошку, кДж/кг·К

					<i>КР 000.142.003.006.2024.РПЗ</i>	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

$$c_H := 3.56 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - \text{теплоємність незамороженого горошку, кДж/кг·К}$$

$$c_3 := 1.96 \cdot \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - \text{теплоємність замороженого горошку, кДж/кг·К}$$

$$t_{кр} := -0.9 \cdot ^\circ\text{C} - \text{кріоскопічна температура для горошку, } ^\circ\text{C}$$

Проводимо розрахунок

$$Q_2 := G \cdot [c_H \cdot (t_{Поч} - t_{кр}) + w \cdot \omega \cdot r + c_3 \cdot (t_{кр} - t_{кін})] = 52.563 \cdot \text{кВт} \quad (3.8)$$

Площу решітчастої стрічки конвеєра визначаємо для значення нагріву повітря у флюїдизаційному шарі

$$\Delta t_{II} := 3 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$F_{\text{конв}} := \frac{Q_2}{w_0 \cdot \rho_{\text{пов}} \cdot c_{\text{пов}} \cdot \Delta t_{II}} = 2.783 \cdot \text{м}^2 \quad (3.10)$$

$$b_{\text{конв}} := 0.8 \cdot \text{м}$$

$$L_{\text{конв}} := \frac{F_{\text{конв}}}{b_{\text{конв}}} = 3.48 \cdot \text{м}$$

$$V_{II} := F_{\text{конв}} \cdot w_0 = 11.655 \cdot \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad (3.12)$$

$$t_{B2} := t_{II\text{M}} + \Delta t_{II} = -27 \cdot ^\circ\text{C}$$

					<i>KP 000.142.003.006.2024.P13</i>	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

$$\Theta_{\Pi} := \frac{\Delta t_{\Pi}}{\ln\left(\frac{t_{\text{кін}} - t_{\text{ПМ}}}{t_{\text{кін}} - t_{\text{В2}}}\right)} = 8.411 \cdot ^\circ\text{C} \quad (3.14)$$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі для різних коефіцієнтів порізності шару та будуємо графік. Для цього необхідно вивести графік залежності $\alpha(\varepsilon)$

Визначаємо критерій Архімеда

$$\text{Ar} := \frac{9.81 \cdot (d_{\text{сер}})^3 \cdot (\rho_{\text{пр}} - \rho_{\text{пов}}) \cdot \rho_{\text{пов}}}{\mu_{\text{пов}}^2} = 2.892 \times 10^7 \quad (3.15)$$

$$\text{Re} := \frac{\text{Ar} \cdot \varepsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{\text{Ar} \cdot \varepsilon^{4.75}}} \quad (3.16)$$

Порізність шару – це основна характеристика динамічного середовища псевдозрідженого потоку. По суті ε – це частка пустого простору в шарі продукції. Для нерухомого шару приймають $\varepsilon = 0.4$, для стійкого псевдозрідженого стану приймають $\varepsilon = 0.55 \dots 0.65$. $\varepsilon = 1$ – це стан, коли більшість та/або всі частинки продукції виносяться за межі шару продукції. Отже, для графіку дослідження зміни коефіцієнту порізності шару приймаємо такий проміжок:

$$\varepsilon := 0.56, 0.57 \dots 0.65$$

$$\text{Nu} := 1.6 \cdot 10^{-2} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\text{Re}}{\varepsilon}\right)^{1.3} \quad (3.17)$$

					<i>KP 000.142.003.006.2024.P13</i>	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

$$Nu := 0.4 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{Re}{\epsilon} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.18)$$

Складаємо, умову для визначення Nu в ПЗ MathCAD

$$\text{if} \left[\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} < 200, 1.6 \cdot 10^{-2} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} \right)^{1.3}, 0.4 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} \right)^{\frac{2}{3}} \right]$$

Формула коефіцієнту тепловіддачі при заморозці горошку має наступний вигляд:

$$\alpha(\epsilon) := \frac{\lambda_{\text{пов}} \cdot Nu}{d_{\text{сер}}} \quad (3.19), \text{ де}$$

Підставляємо формулу для визначення критерія Нусельта та виводимо графік

$$\alpha(\epsilon) := \frac{\lambda_{\text{пов}} \cdot \text{if} \left[\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} < 200, 1.6 \cdot 10^{-2} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} \right)^{1.3}, 0.4 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} \right)^{\frac{2}{3}} \right]}{d_{\text{сер}}}$$

Отримали залежність подібну до лінійної.

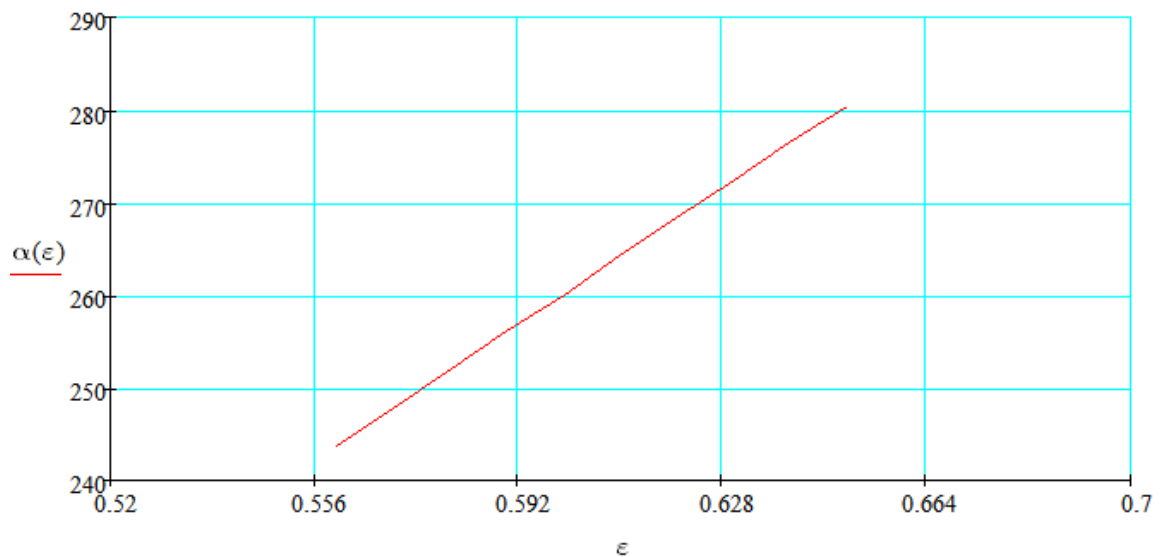


Рис. 3.1 Графік залежності зміни коефіцієнта порізності шару з використанням рівнянь 3.17 та 3.18

Для аналізу коефіцієнту тепловіддачі за умов розрахунку за різних методологій проведемо побудову графіку з використанням рівняння для обтікання кулі, який наведено у [1] для будь-яких режимів, яке має наступний вигляд:

$$Nu := 2 + 0.03 \cdot Pr^{0.33} \cdot Re^{0.54} + 0.35 \cdot Pr^{0.35} \cdot Re^{0.58} \quad (3.21)$$

Підставляємо формулу для розрахунку числа Рейнольдса

$$Nu := 2 + 0.03 \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} \right)^{0.54} + 0.35 \cdot Pr^{0.35} \cdot \left(\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} \right)^{0.58}$$

Отримуємо рівняння залежності графік залежності $\alpha_1(\epsilon)$

$$\alpha(\epsilon) := \frac{\lambda_{\text{пов}} \cdot Nu}{d_{\text{сеп}}} \quad (3.23)$$

$$\alpha_1(\epsilon) := \frac{\lambda_{\text{пов}} \cdot \left[2 + 0.03 \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} \right)^{0.54} + 0.35 \cdot Pr^{0.35} \cdot \left(\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} \right)^{0.58} \right]}{d_{\text{сеп}}} \quad (3.24)$$

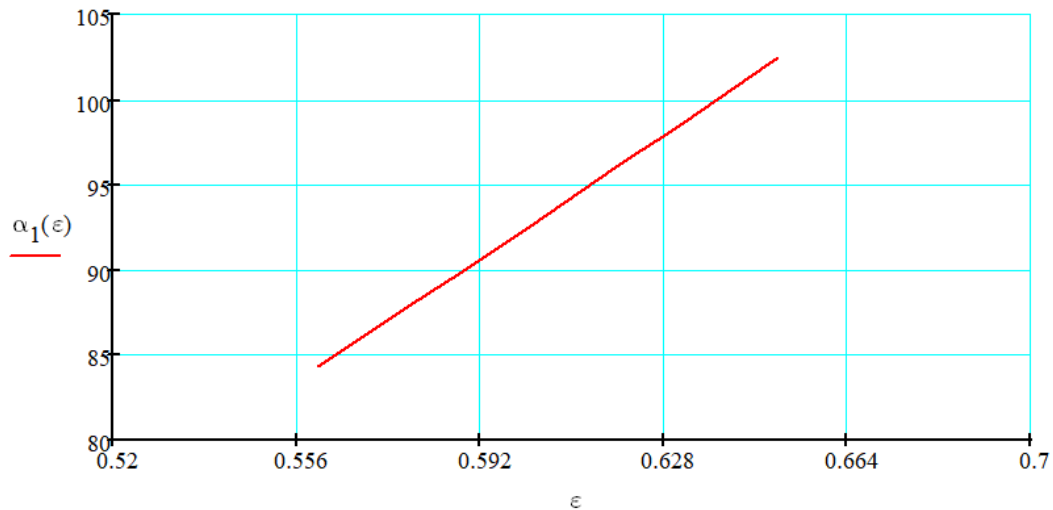


Рис. 3.2 Графік залежності зміни коефіцієнта тепловіддачі від коеф. пористості шару з використанням рівняння [2]

Проведемо побудову графіку з використанням рівняння Кришера-Лооса, яке має наступний вигляд:

$$Nu := 2 + Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(0.4 \cdot Re^{\frac{1}{2}} + 0.06 \cdot Re^{\frac{2}{3}} \right) \quad (3.25)$$

Підставляємо формулу для розрахунку числа Рейнольдса

$$Nu := 2 + Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left[0.4 \cdot \left(\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.06 \cdot \left(\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} \right)^{\frac{2}{3}} \right]$$

Отримуємо рівняння залежності графік залежності α₂(ε)

$$\alpha_2(\epsilon) := \frac{\lambda_{пов} \cdot \left[2 + Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left[0.4 \cdot \left(\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.06 \cdot \left(\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \right]}{d_{сеп}} \quad (3.27)$$

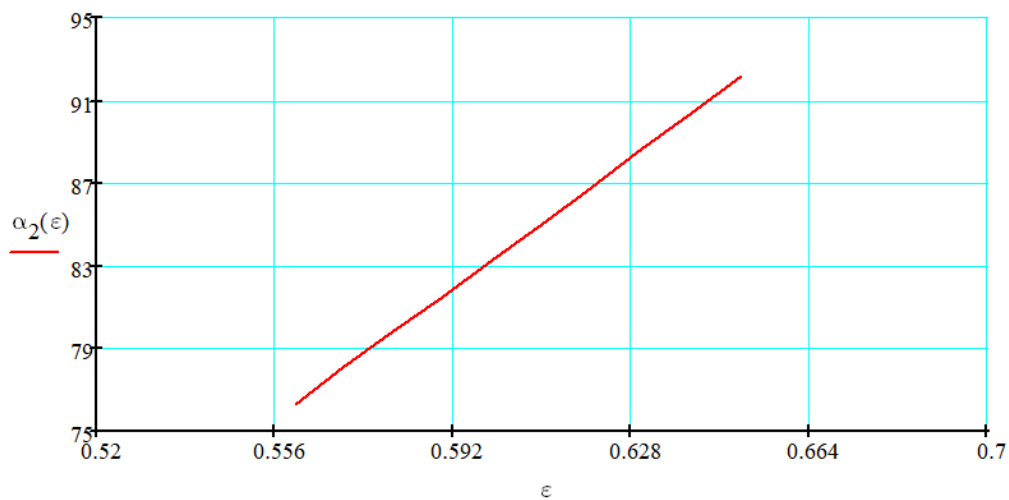


Рис. 3.3 Графік залежності зміни коефіцієнта тепловіддачі від коеф. пористості шару з використанням рівняння 3.25 Кришера-Лооса

Проведемо побудову графіку з використанням рівняння Ранца-Маршалла, яке має наступний вигляд:

$$Nu := 2 + 0.6 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{1}{2}} \quad (3.28)$$

$$Nu := 2 + 0.6 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.29)$$

$$\alpha_3(\epsilon) := \frac{\lambda_{\text{ПОВ}} \cdot \left[2 + 0.6 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \epsilon^{4.75}}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]}{d_{\text{сер}}}$$

Отримуємо рівняння залежності графік залежності $\alpha_3(\epsilon)$

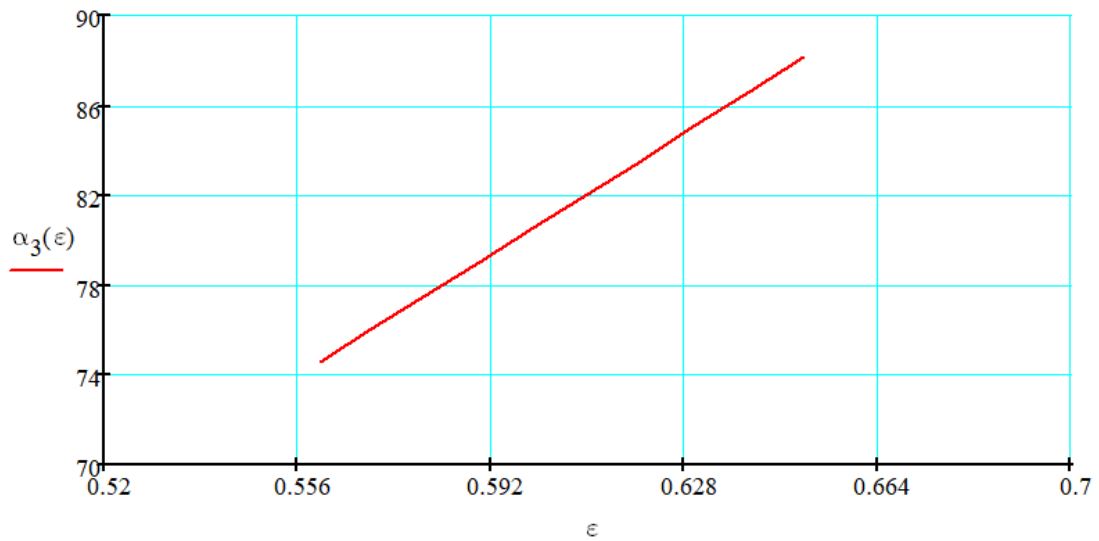


Рис. 3.4 Графік залежності зміни коефіцієнта тепловіддачі від коеф. порізності шару з використанням рівняння 3.28 Ранца-Маршала

Будуємо збірний графік для $\alpha(\epsilon)$, $\alpha_1(\epsilon)$, $\alpha_2(\epsilon)$, $\alpha_3(\epsilon)$

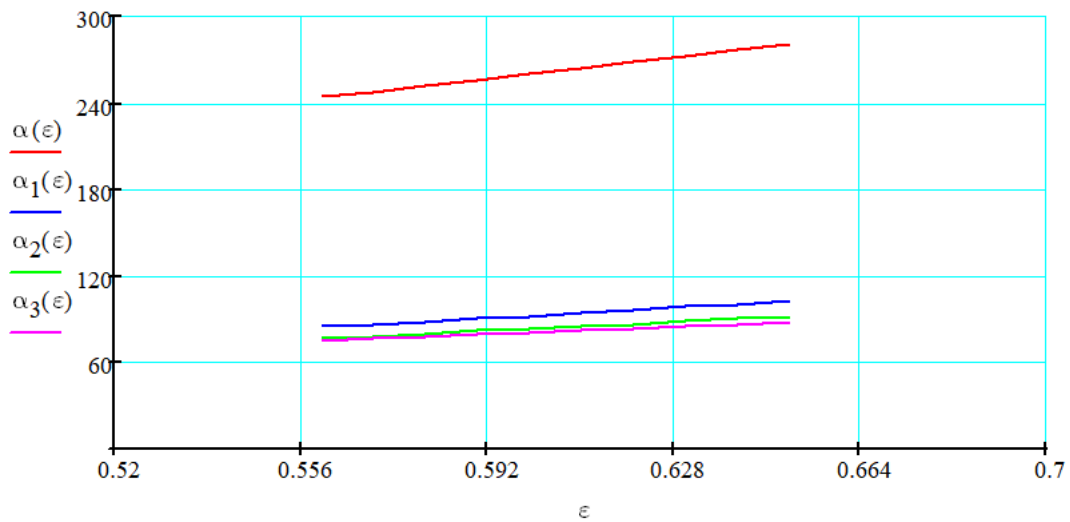


Рис. 3.5 Збірний Графік залежності зміни коефіцієнта тепловіддачі від коеф. порізності шару з використанням рівняння

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

$\varepsilon =$	$\alpha_1(\varepsilon) =$	$\alpha_2(\varepsilon) =$	$\alpha_3(\varepsilon) =$	$\alpha(\varepsilon) =$
0.56	84.23	76.342	74.501	243.752
0.57	86.206	78.06	75.998	247.884
0.58	88.194	79.789	77.498	252.007
0.59	90.194	81.528	79.004	256.12
0.6	92.206	83.276	80.513	260.224
0.61	94.231	85.035	82.027	264.32
0.62	96.267	86.804	83.545	268.408
0.63	98.315	88.582	85.067	272.487
0.64	100.375	90.37	86.593	276.559
0.65	102.446	92.167	88.123	280.623

Висновок: у результаті проведених розрахунків з Рис. 3.5 бачимо, що $\alpha_1(\varepsilon), \alpha_2(\varepsilon), \alpha_3(\varepsilon)$ значно відрізняється від $\alpha(\varepsilon)$. Такий результат обумовлений певними обмеженнями для кожного з цих рівнянь, адже рівняння для $\alpha_1(\varepsilon), \alpha_2(\varepsilon), \alpha_3(\varepsilon)$ описані для одиночної кулі. Можу припустити, що при великих значеннях Re в рівняннях 3.28, 3.25 та [2] не враховується додаткова турбулізація, яка утворюється за рахунок потоку частинок у псевдозрідженому шарі.

Прийняв рішення дослідити зміну коефіцієнту тепловіддачі при малих значеннях Рейнольдса у проміжку $0 \dots 300$. Коеф $\varepsilon = 60$. Складаю рівняння:

Значення Рейнольдса

$$Re := 1, 2 \dots 300$$

$$\alpha(Re) := \frac{\lambda_{\text{пов}} \cdot \text{if} \left[\frac{Re}{\varepsilon} < 200, 1.6 \cdot 10^{-2} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)^{1.3}, 0.4 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)^{\frac{2}{3}} \right]}{d_{\text{сеп}}}$$

$$\alpha_1(Re) := \frac{\lambda_{\text{пов}} \cdot \left[2 + 0.03 \cdot Pr^{0.33} \cdot (Re)^{0.54} + 0.35 \cdot Pr^{0.35} \cdot (Re)^{0.58} \right]}{d_{\text{сеп}}} \quad (3.32)$$

$$\alpha_2(\text{Re}) := \frac{\lambda_{\text{пов}} \cdot \left[2 + \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \cdot \left[0.4 \cdot (\text{Re})^{\frac{1}{2}} + 0.06 \cdot (\text{Re})^{\frac{2}{3}} \right] \right]}{d_{\text{сер}}} \quad (3.33)$$

$$\alpha_2(\text{Re}) := \frac{\lambda_{\text{пов}} \cdot \left(2 + 0.6 \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}} \cdot \text{Re}^{\frac{1}{2}} \right)}{d_{\text{сер}}} \quad (3.34)$$

Помітно, що при малих значеннях коефіцієнт тепловіддачі α значно менше, ніж $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, але він швидко зростає зі збільшенням значення Re . При досягненні $Re = 60$, коефіцієнт тепловіддачі для всіх рівнянь приблизно однаковий. Надалі α починає інтенсивно зростати. Різниця у значеннях $\alpha_1(\varepsilon), \alpha_2(\varepsilon), \alpha_3(\varepsilon)$ – доволі незначена.

При досягненні $Re = 120$ виконується умова $\frac{Re}{\varepsilon} > 200$ і починається розрахунок (див.3.31) за другим рівнянням. Коефіцієнт тепловіддачі дещо зменшується, але після починає інтенсивно зростати.

У підсумку, можу зазначити, що вважаю рівняння 3.17 та 3.18 при визначенні коефіцієнту тепловіддачі для нашого ШМА більш коректними, але для точного дослідження та коректного порівняння зміни коефіцієнту для нашого продукту необхідно провести додаткові дослідження. Із застосування реальних лабораторних установок.

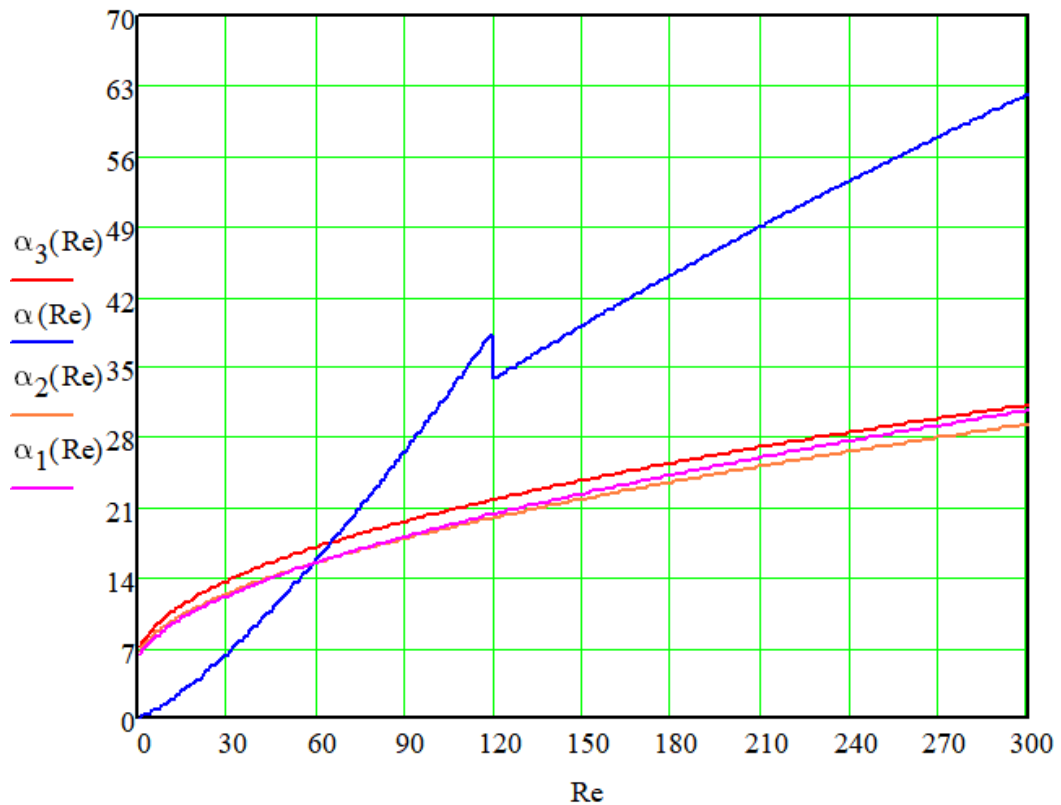


Рис. 3.6 Зміна коефіцієнту тепловіддачі при малих значеннях Рейнольдса

Приймаю коефіцієнт тепловіддачі та продовжую розрахунок

$$\alpha = 260 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Площа продукту, який знаходиться на конвеєрі:

$$F_{\text{пр}} := \frac{Q_2 \cdot 10^3}{\alpha \cdot \Theta_{\text{п}}} = 24.036 \cdot \text{м}^2 \quad (3.35)$$

$$M := F_{\text{пр}} \cdot \rho_{\text{пр}} \cdot \frac{d_{\text{ев}}}{6} = 34.972 \cdot \text{кг} \quad (3.36)$$

Висота насипного шару продукту на стрічці конвеєру

$$\rho_{\text{нас}} := 750 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$H_{\text{нас}} := \frac{M}{F_{\text{конв}} \cdot \rho_{\text{нас}}} = 0.017 \quad (3.37)$$

Висота шару горошку після флюїдизації

$$H_{\text{ф}} := H_{\text{нас}} \cdot \frac{1 - \epsilon_0}{1 - \epsilon} = 0.019 \cdot m \quad (3.38)$$

ϵ_0 – порізність насипного шару, для горошку = 0.55 [3]

Проведемо розрахунок тривалості заморожування горошку. Маса горошку складає 1,18 грам. Діаметр, як і вказувалось раніше 7.9 мм. Всередині горошок немає кісточки, тому нам необхідно заморожувати весь об'єм плоду. Параметри м'якоті наступні:

$$\rho = 1020 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \text{ – щільність горошку}$$

$$w = 0,74 \frac{\text{кг}}{\text{кг}} \text{ – вологість горошку}$$

$$c_0 = 3,31 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \text{ – питома теплоємність незамороженої м'якоті продукту}$$

$$c = 1,76 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \text{ – питома теплоємність замороженої м'якоті продукту}$$

$$\lambda_0 = 0,37 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \text{ – коефіцієнт теплопровідності незамороженої м'якоті}$$

$$\lambda = 1,34 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \text{ – коефіцієнт теплопровідності замороженої м'якоті}$$

$$V = 0.000003053 \text{ м}^3 \text{ – середній об'єм горошку}$$

$$S = 0.00102 \text{ м}^2 \text{ – площа поверхні горошку}$$

$$\Phi := \frac{V}{S \cdot R} = 0.374 \quad (3.39)$$

$$k := \frac{1}{\Phi} = 2.673 \quad (3.40)$$

					<i>KP 000.142.003.006.2024.P13</i>	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Число Біо

$$\text{Bi} := \frac{\alpha \cdot R}{\lambda_{\text{зам}}} = 1.552 \quad (3.41)$$

Підставляємо та отримуємо Планківську тривалість заморожування

$$\tau_0 := \Phi \cdot \frac{R \cdot q \cdot \rho \cdot \omega}{(t_{\text{кр}} - t_{\text{в2}})} \left(\frac{R}{2 \cdot \lambda} + \frac{1}{\alpha} \right) = 265.58233418 \text{ с} \quad (3.42)$$

Проводимо розрахунок поправок

1. Поправка на теплоємність

$$\tau_1 := \frac{\rho \cdot c \cdot R^2}{\lambda} \cdot \frac{1 + \ln \left(1 + \frac{0.65}{\text{Bi}} \right)}{4 + 2 \cdot (k - 1)} = 29.631 \text{ с} \quad (3.43)$$

Розраховуємо значення а

$$a := \frac{0 - t_{\text{кр}}}{t_{\text{кр}} - t_{\text{хл}}} = 0.034$$

Функцію F (Bi,a,k) визначаємо з таблиці 3.1

$$F(1.746, 0.034, 2) := 0.060$$

$$\tau_2 := - \frac{q \cdot w \cdot \rho \cdot R^2}{\lambda \cdot (t_{\text{кр}} - t_{\text{хл}})} \cdot 0.060 = -32.855 \text{ с}$$

3. Поправка 3 на зміну теплопровідності замороженої частини

Розраховуємо значення b

$$b := \frac{2 \cdot \lambda_0 + \lambda}{3 \cdot \lambda_0} \cdot a = 0.065$$

					<i>KP 000.142.003.006.2024.P13</i>	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

$$\tau_3 := \Phi \cdot \frac{q \cdot w \cdot \rho \cdot R^2}{(t_{кр} - t_{хл})} \cdot \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda^2} \cdot \frac{b \cdot (Bi + 2)}{2 \cdot Bi} \cdot \ln \left(1 + \frac{Bi}{Bi + 2} \right) = 3.975 \text{ с} \quad (3.47)$$

Bi	$a = \frac{t_0 - t_{кр}}{t_{кр} - t_{хл}}$											
	0,005	0,01	0,015	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0,1	0,980	1,27	1,45	1,58	1,76	1,89	1,98	2,05	2,11	2,17	2,21	2,25
0,2	0,371	0,502	0,588	0,652	0,746	0,814	0,866	0,909	0,945	0,975	1,00	1,03
0,3	0,208	0,288	0,342	0,384	0,447	0,493	0,530	0,560	0,586	0,608	0,628	0,646
0,4	0,137	0,194	0,233	0,263	0,310	0,345	0,373	0,397	0,417	0,435	0,451	0,465
0,5	0,100	0,142	0,173	0,196	0,233	0,262	0,285	0,304	0,321	0,336	0,349	0,361
0,6	0,076	0,111	0,135	0,155	0,185	0,209	0,228	0,245	0,260	0,272	0,284	0,294
0,7	0,061	0,089	0,110	0,126	0,153	0,173	0,190	0,204	0,217	0,229	0,239	0,248
0,8	0,051	0,074	0,092	0,106	0,129	0,147	0,162	0,175	0,186	0,197	0,206	0,215
0,9	0,043	0,063	0,079	0,091	0,112	0,128	0,141	0,153	0,163	0,173	0,181	0,189
1	0,037	0,055	0,687	0,080	0,098	0,113	0,125	0,136	0,145	0,154	0,162	0,169
1,5	0,021	0,032	0,041	0,048	0,060	0,070	0,079	0,087	0,094	0,100	0,106	0,112
2	0,014	0,022	0,029	0,034	0,044	0,052	0,059	0,065	0,071	0,076	0,081	0,086
2,5	0,011	0,017	0,022	0,027	0,034	0,041	0,047	0,052	0,057	0,062	0,067	0,071
3	0,008	0,014	0,018	0,022	0,029	0,035	0,040	0,045	0,049	0,053	0,057	0,061
3,5	0,007	0,012	0,015	0,019	0,025	0,030	0,035	0,039	0,044	0,047	0,051	0,055
4	0,006	0,010	0,014	0,017	0,022	0,027	0,031	0,036	0,039	0,043	0,047	0,050
4,5	0,005	0,009	0,012	0,015	0,020	0,025	0,029	0,033	0,036	0,040	0,043	0,046
5	0,005	0,008	0,011	0,014	0,018	0,023	0,027	0,030	0,034	0,037	0,040	0,043
∞	0,001	0,002	0,004	0,005	0,007	0,010	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	0,022

Табл. 3.7 Функція F (Bi,a,2) для кулі

4. Поправка на початкову температуру тіла

$$A := \frac{\lambda_0 \cdot q \cdot w}{c_0 \cdot (t_{кр} - t_{хл}) \cdot \lambda} = 0.938 \quad (3.48)$$

$$\chi_0 := \frac{(k + 1) \cdot (k + 5 + 2 \cdot \sqrt{2 \cdot k + 6})}{4} = 13.231 \quad (3.49)$$

$$\tau_4 := \Phi \cdot c_0 \cdot \rho \cdot R \cdot \frac{t_{поч} - t_{кр}}{t_{кр} - t_{хл}} \cdot \left[\frac{R}{\lambda} \cdot \left(2 + \frac{A \cdot \chi_0}{k + 1} \cdot \frac{Bi + 2}{Bi} \right)^{-1} + \frac{1}{\alpha} \right] = 27.455 \text{ с}$$

Розраховуємо Bi_0 для охолодженого горошку

$$Bi_H := \frac{\alpha \cdot R}{\lambda_0} = 5.622 \quad (3.51)$$

$$A_{пов} = \frac{\chi_H \cdot \Phi \cdot A_{об}}{Bi_H} \rightarrow A_{пов} = 0.59133074201814603724 \cdot A_{об} \quad (3.52)$$

Оскільки, $A_{об} < 1$, то $A_{п} \cdot \frac{t_{поч} - t_{хл}}{t_{кр} - t_{хл}} < 0,66 < 1$ і час попереднього охолодження, вийде від'ємним. Це означає, що час охолодження дуже малий. Тому вважаємо, що час охолодження = 0.

Отже: сумуємо час заморожування

$$\tau_{сум} := \tau_0 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 = 280.033 \text{ с} \quad (3.53)$$

Переходимо до компоновання обладнання в апараті, який схематично зображено на рис. 3.8. Розраховуємо довжину ШМА.

$D_8 = 0.3 \text{ м}$ – діаметр барабану конвеєра

$\delta_3 = 0.2 \text{ м}$ - прийнятий зазор між барабаном та торцевими стінками апарату

$\delta_{і3} = 0.2 \text{ м}$ – товщина стінки з врахуванням товщини шару ізоляції

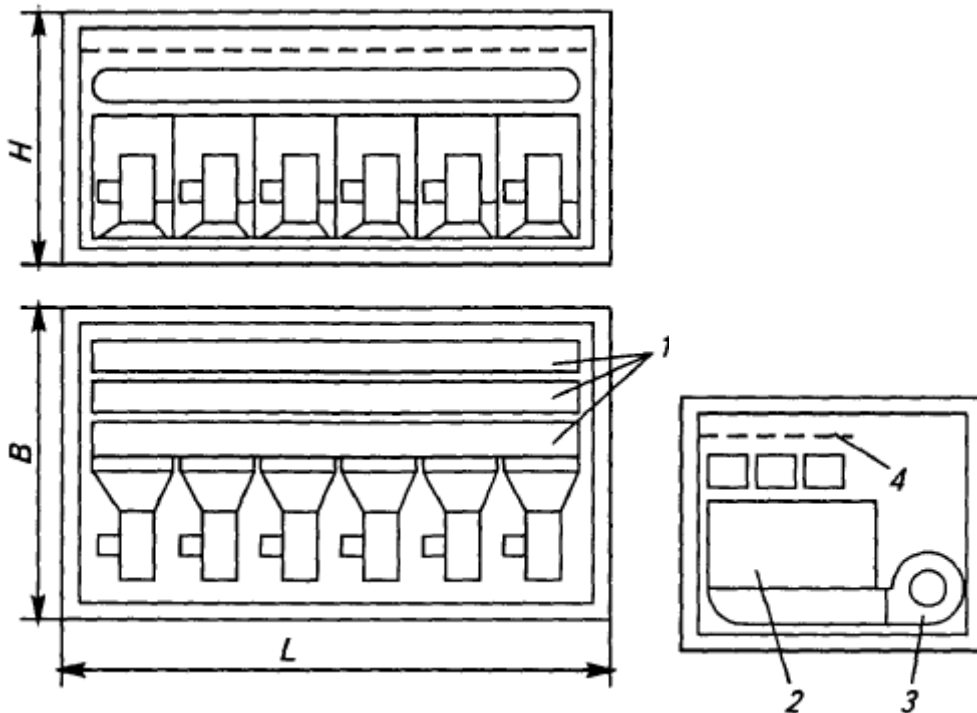


Рис. 3.8 Схема компоновання флюїдизаційного апарату для заморожування горошку [4]

					<i>KP 000.142.003.006.2024.P13</i>	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

$$L_{\text{ап}} := L_{\text{конв}} + D_{\text{б}} + 2 \cdot \delta_3 + 2 \cdot \delta_{\text{із}} = 4.578 \cdot \text{м}$$

Розрахунок висоти апарату

$h_{\text{пов}} = 1 \text{ м}$ – висота повітроохолоджувача, приблизно

$h_{\text{кан}} = 0.2 \text{ м}$ – висота каналу для проходу повітря

$$H_{\text{ап}} := 2 \cdot H_{\text{ф}} + D_{\text{б}} + h_{\text{пов}} + 2 \cdot h_{\text{кан}} + 3 \cdot \delta_3 + 2 \cdot \delta_{\text{із}} = 4.338 \cdot \text{м} \quad (3.54)$$

Переходимо до розрахунку теплопритоків через огорожувальні конструкції. Температуру в приміщенні, в якому буде встановлено обладнання приймаю – 25 °С.

Розраховуємо площу

$$k := \frac{0.3}{1000} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$F := 2 \cdot H_{\text{ап}} \cdot 5 + 2 \cdot 2.6 \cdot 4.6 + 2 \cdot 5 \cdot 4.6 = 113.297 \cdot \text{м}^2 \quad (3.55)$$

$$Q_1 := k \cdot F \cdot (t_{\text{нс}} - t_{\text{пм}}) = 1.869 \cdot \text{кВт} \quad (3.56)$$

$$Q_{4\text{дв}} := 0.3 \cdot Q_2 = 15.769 \cdot \text{кВт} \quad (3.56)$$

Експлуатаційні теплопритоки через завантажувальні вікна

$$Q_{4\text{ок}} := 0.5 \cdot Q_1 = 0.935 \cdot \text{кВт}$$

$$Q_0 := Q_1 + Q_2 + Q_{4\text{дв}} + Q_{4\text{ок}} = 71.136 \cdot \text{кВт}$$

Розраховуємо необхідну теплообмінну площу наших повітроохолоджувачів, коефіцієнт теплопередачі прийнятий – 10 Вт/м²К

$$F_{\text{пов}} := \frac{Q_0 \cdot 10^3}{k_0 \cdot \Theta_{\text{п}}} = 845.7 \cdot \text{м}^2$$

					<i>KP 000.142.003.006.2024.P13</i>	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Для ШМА приймаємо 4 батареї повітроохолоджувачів GHP 065 F/28. Повітроохолоджувач має наступні технічні характеристики

№	Найменування	Позначення	Значення
1	Площа теплообмінної поверхні	$f_{\text{пов}}$	255,2 м ²
2	Зовнішній діаметр труби	$d_{\text{н}}$	0,02 м
3	Крок оребрення	t_p	8 мм
4	Крок між трубам	S_p	60 мм
5	Довжина повітроохолоджувача	$L_{\text{пов}}$	3060 мм
6	Ширина повітроохолоджувача	b_0	1212 мм
7	Висота повітроохолоджувача	$h_{\text{пов}}$	1040 мм

Табл. 3.8 Параметри повітроохолоджувача батарейного типу GHP 065 F/28

Необхідно розрахувати втрати напору (Па) вентиляторами повітроохолоджувача. Втрата тиску напору (Па) складається з втрат напору у флюїдизаційному шарі горошку Δp_{ϕ} , втрат напору у батареї повітроохолоджувача $\Delta p_{\text{в}}$, втрат в решітчастій стрічці конвеєра $\Delta p_{\text{р}}$, втрат напору на вході повітря у вентилятор $\Delta p_{\text{вх}}$, втрат напору на чотирьох поворотах потоку повітря $\Delta p_{\text{пов}}$, втрат напору у дифузори $\Delta p_{\text{д}}$

$$\Delta p := 1.1 \cdot (\Delta p_{\phi} + \Delta p_{\text{р}} + \Delta p_{\text{в}} + \Delta p_{\text{вх}} + \Delta p_{\text{пов}} + \Delta p_{\text{д}}) \quad (3.60)$$

Формула втрат напору у псевдозрідженому шарі продукту розраховується по формулі:

$$\Delta p_{\phi} := 1.67 \cdot \frac{(Re \cdot H_{\phi})^{0.2}}{d_{\text{ев}}} \cdot \frac{M}{F_{\text{конв}}} \quad (3.61)$$

Розраховую число Рейнольдса

$$Re := \frac{w_0 \cdot d_{\text{ев}}}{\nu_{\text{пов}}} = 3.49 \times 10^3 \quad (3.62)$$

Втрати у флюїдизаційному шарі

$$\Delta p_{\phi} := 1.67 \cdot \left(\frac{Re \cdot H_{\phi}}{d_{\text{ев}}} \right)^{0.2} \cdot \frac{M}{F_{\text{конв}}} = 124.4 \cdot \text{Па} \quad (3.63)$$

					<i>KP 000.142.003.006.2024.P13</i>	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Втрати напору у решітчастій стрічці конвеєру з сіткою розміром 3 x 3 мм і відносним живим перерізом для проходу повітря складає $S_{\text{від}} = 0,0308$ для цих розмірів.

$$\Delta p_p := 2 \cdot \left(13.72 w_0^2 - 43.12 \cdot w_0 + 119.36 \right) = 358.894 \cdot \text{Па} \quad (3.64)$$

Втрати напору в батареї повітроохолоджувача з пластинчастим оребренням

$$\Delta p_{\text{по}} := 0.132 \cdot \frac{L_p}{d_{\text{ек.п}}} \cdot (\rho_{\text{пов}} \cdot w_{\text{ж}})^{1.7} \quad (3.65)$$

$$d_{\text{ек.п}} := \frac{2 \cdot U \cdot s_p}{U + s_p} \quad (3.66)$$

Де, U – відстань між ребрами

$$U = t_p - 2\delta_i - \delta_p$$

$$U := t_p - 2 \cdot \delta_{\text{пов}} - \delta_p = 0.0055 \cdot \text{м}$$

$$d_{\text{ек.п}} := \frac{2 \cdot U \cdot s_p}{U + s_p} = 0.0101 \cdot \text{м}$$

$$w_{\text{ж}} := \frac{\varphi \cdot V_{\text{п}}}{6 \cdot L_{\text{пов}} \cdot b_{\text{пов}}} \quad (3.67)$$

Коефіцієнт стискання струменя

$$\varphi := \frac{1}{\left[1 - \frac{d_{\text{н}}}{s_p} \cdot \left(1 + \frac{s_p \cdot \delta_p}{U \cdot d_{\text{н}}} \right) \right]} = 1.737 \quad (3.68)$$

$$w_{\text{ж}} := \frac{\varphi \cdot V_{\text{п}}}{6 \cdot L_{\text{пов}} \cdot b_{\text{пов}}} = 0.91$$

					<i>KP 000.142.003.006.2024.РІЗ</i>	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

$$\Delta p_{\text{по}} := 0.132 \cdot \frac{L_p}{d_{\text{ек.п}}} \cdot (\rho_{\text{пов}} \cdot w_{\text{ж}})^{1.7} = 21.819 \cdot \text{Па} \quad (3.69)$$

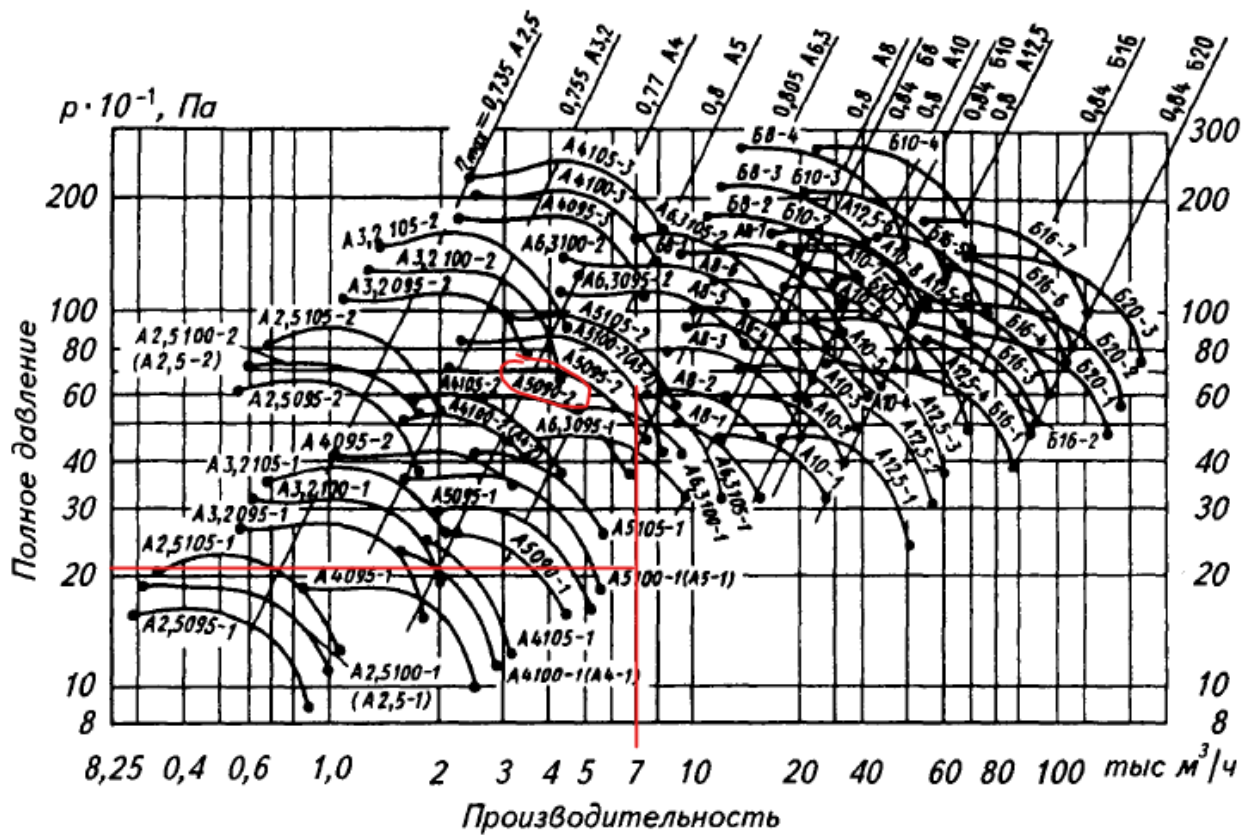


Рис. 3.9 Характеристики відцентрових вентиляторів

Проводимо підбір відцентрових вентиляторів типу Ц4-70 та Ц4-76 за допомогою рис.3.9. В результаті, отримуємо 6 відцентрових вентиляторів Ц4-70 №5. Діаметр вентилятору складає 500 мм ($d_{\text{вен}}$). Необхідно забезпечити $11,655 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$. Вентилятори Ц4-70 №5 у кількості 6 шт забезпечують об'ємну витрату $11,667 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$

Необхідна кількість об'ємного потоку повітря

$$V_{\text{п}} = 11.655 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad (3.70)$$

Кількість об'ємного потоку повітря, яку забезпечують вентилятори

$$V_{\text{п}_p} := \frac{7000}{3600} \cdot 6 = 11.667 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad (3.71)$$

Проводимо розрахунок $\Delta p_{\text{ВХ}}$

$$\Delta p_{\text{ВХ}} := \zeta_{\text{ВХ}} \cdot \rho_{\text{ПОВ}} \cdot \frac{w_{\text{ВХ}}^2}{2} \quad (3.72)$$

$\zeta_{\text{ВХ}} = 0,5$ – коефіцієнт місцевого опору

Швидкість повітря на вході до вентилятору

$$w_{\text{ВХ}} := \frac{4 \cdot V_{\text{П}_p}}{6 \cdot \pi \cdot d_{\text{ВЕН}}^2} = 9.903 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (3.73)$$

Тоді

$$\Delta p_{\text{ВХ}} := \zeta_{\text{ВХ}} \cdot \rho_{\text{ПОВ}} \cdot \frac{w_{\text{ВХ}}^2}{2} = 36.384 \text{ Па} \quad (3.73)$$

Розраховую втрати напору потоку повітря на чотирьох поворотах

$$\Delta p_{\text{ПОВ}} := 4 \cdot \zeta_{\text{ПОВ}} \cdot \rho_{\text{ПОВ}} \cdot \frac{w_{\text{ПОВ}}^2}{2} \quad (3.74)$$

$\zeta_{\text{ПОВ}} = 0,3$ – коефіцієнт місцевого опору повороту потоку

$w_{\text{ПОВ}}$ – швидкість на поворотах, м/с

$h_{\text{стелі}} = 1$ м, приймаємо висоту стелі

$$w_{\text{ПОВ}} := \frac{V_{\text{П}_p}}{(L_{\text{ап}} - 2 \cdot \delta_{\text{із}}) \cdot h_{\text{стелі}}} = 2.792 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (3.75)$$

$$\Delta p_{\text{ПОВ}} := 4 \cdot \zeta_{\text{ПОВ}} \cdot \rho_{\text{ПОВ}} \cdot \frac{w_{\text{ПОВ}}^2}{2} = 6.942 \text{ Па} \quad (3.76)$$

Переходжу до розрахунку втрати напору в дифузори

$$\Delta p_{\text{Д}} := \zeta_{\text{Д}} \cdot \rho_{\text{ПОВ}} \cdot \frac{w_{\text{ВНХ}}^2}{2} \quad (3.77)$$

					<i>KP 000.142.003.006.2024.P13</i>	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

$\zeta_d = 0,15$ – коефіцієнт місцевого опору дифузору

Швидкість повітря у вихідному вікні вентилятору

$$w_{\text{вих}} := \frac{V_{\text{п.р}}}{6 \cdot b^2} = 5.401 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (3.78)$$

Після підстановки маємо

$$\Delta p_d := \zeta_d \cdot \rho_{\text{пов}} \cdot \frac{w_{\text{вих}}^2}{2} = 3.247 \text{ Па} \quad (3.79)$$

Складаємо суму всіх отриманих значень падіння тиску

$$\Delta p := 1.1 \cdot (\Delta p_{\text{ф}} + \Delta p_{\text{р}} + \Delta p_{\text{по}} + \Delta p_{\text{вих}} + \Delta p_{\text{пов}} + \Delta p_d) = 606.839 \text{ Па}$$

Напір вентилятору при температурі повітря 25 °С (температура в цеху) розраховується наступним чином:

$$\Delta p_{25} := \Delta p \cdot \frac{\rho_{25}}{\rho_{\text{пов}}} = 490.706 \text{ Па} \quad (3.80)$$

Де, $\rho_{25} = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – густина повітря за температури 25 °С

Проводимо розрахунок електричної потужності вентиляторів. Коефіцієнт корисної дії в даному режимі для обраних вентиляторів складає $\eta = 0,77$

$$N_{\text{ел}} := \frac{V_{\text{п.р}} \cdot \Delta p}{\eta} = 9194.537 \text{ Вт} \quad (3.81)$$

					<i>КР 000.142.003.006.2024.РПЗ</i>	Арк
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Вибір типу холодильної машини та розрахунок циклу

Розробка холодильної централі варто розпочати з вибору холодильного агенту. Найоптимальнішим, з економічних міркувань, рішенням на сьогодні в Україні є холодильний агент – R507A.

Для розрахунку, температуру кипіння приймаємо - 40°C. Відповідно тиск кипіння – 0,14 МПа. Температуру конденсації приймаємо – 45 °С. Тиск кипіння – 2,10 МПа.

Охолодження – безпосереднє.

Компресора – напівгерметичні поршневі.

Конденсатор – обираю повітряний з ЕС вентиляторами.

Будуємо цикл на діаграмі R507 log p-h одноступеневої холодильної машини (ОХМ).

Продуктивність	
Холодопродуктивність [kW]	= 72,00
Питома холодопродуктивність [kJ/kg]	= 84,22
Теплопродуктивність [kW]	= 139,3
Питома теплопродуктивність [kJ/kg]	= 162,9
Масова витрата в компресорі [kg/h]	= 3078
Масова витрата у випарнику [kg/h]	= 3078
Кипіння	
Температура кипіння [°C]	= -40,0
Температура точки роси на лінії кипіння [°C]	= -40,0
Температура кипіння на лінії насиченої рідини [°C]	= -40,0
Тиск кипіння [bar]	= 1,408
Ефективний перегрів [K]	= 10,0
Додатковий перегрів [K]	= 0
Нагнітання компресора	
Тем-ра нагнітання [°C]	= 82,6
Конденсація	
Температура конденсації [°C]	= 45,0
Температура точки роси на лінії конденсації [°C]	= 45,0
Температура конденсації на лінії насиченої рідини [°C]	= 45,0
Тиск конденсації [bar]	= 21,08
Переохолодження [K]	= 3,0
Додаткове переохолодження [K]	= 0

Табл.4.1 Параметри одноступеневої холодильної машини

				<i>КР 000.142.003.006.2024.РПЗ</i>			
		№ докум.	Підпис	Аналіз методів розрахунку процесу заморожування зеленого горошку в флюїдизаційному швидкоморозильному апараті	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив	<i>Д.М. Ніколасць</i>					29	40
Перевір.	<i>М.М. Масліков</i>				<i>TEXT ННІТІ НУХТ</i>		
Реценз.							
Н. контр.							
Затверд.	<i>М.О. Прядко</i>						

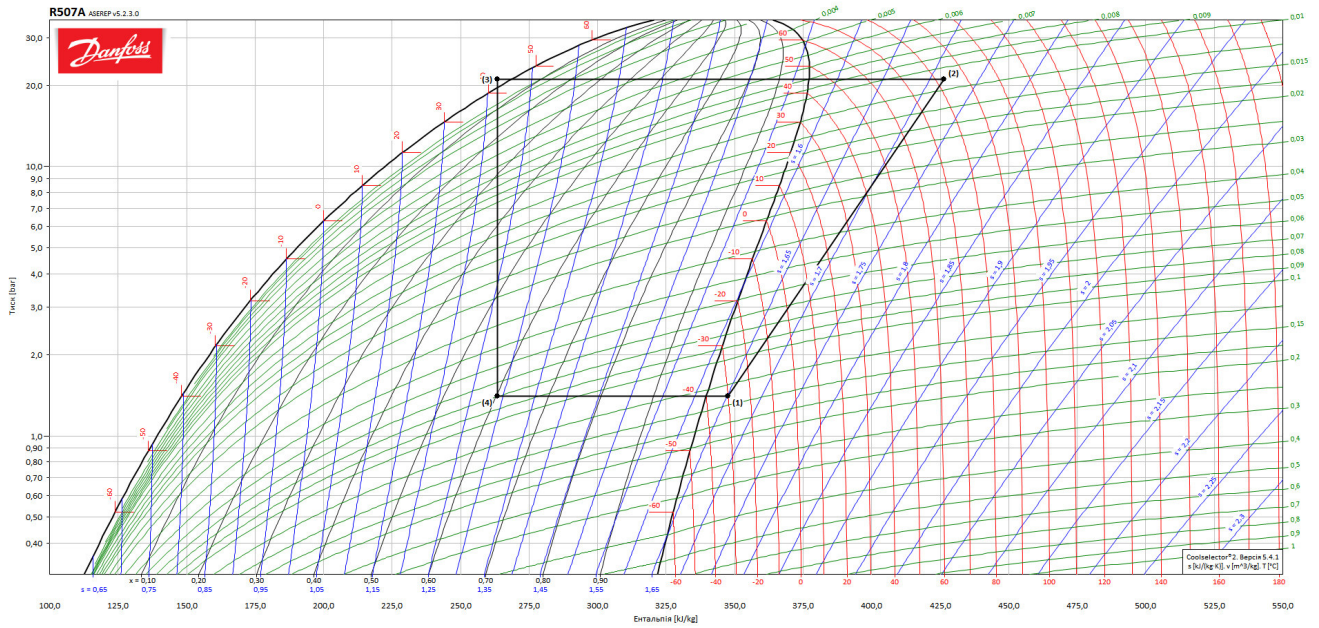
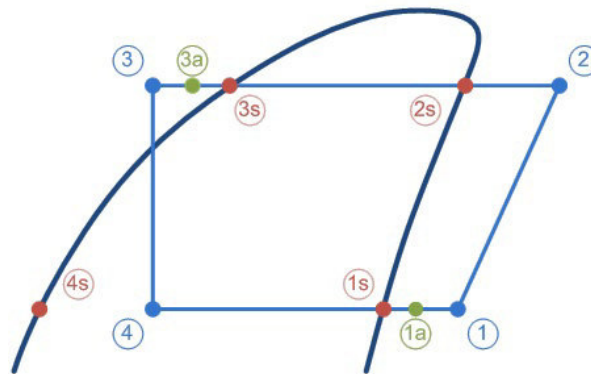


Рис. 4.2 Цикл на базі холодильного агента R507, діаграма $\log(p) h$



Точка	Опис	Температура	Тиск (абс.)	Густина	Ентальпія	Ентропія
		[°C]	[bar]	m ³ /kg	[kJ/kg]	[kJ/(kg·K)]
1	Всмоктування компресором	-30	1,408	0,1382	347,6	1,651
2	Нагнітання компресором (розрахункове)	82,6	21,08	0,0113	426,3	1,714
2s	Точка роси на лінії конденсації	45	21,08	0,0080	377,1	1,568
3s	Точка початку кипіння на лінії конденсації	45	21,08	0,0011	268,5	1,227
3a	Вихід конденсатора	42	21,08	0,0010	263,4	1,211
3	Включаючи додаткове переохолодження	42	21,08	0,0010	263,4	1,211
4	Після розширювального клапана	-40	1,408	0,0794	263,4	1,291
4s	Точка початку кипіння на лінії кипіння	-40	1,408	0,0008	148,2	0,7966
1s	Точка роси на лінії кипіння	-40	1,408	0,1314	339,6	1,618
1a	Вихід випарника	-30	1,408	0,1382	347,6	1,651

Табл. 4.2 Параметри основних точок циклу ОХМ

Знаходимо масову витрату холодоагенту:

$$q_m = \frac{Q_0}{h_{1a} - h_4} = \frac{72}{347 - 263} = 0,857 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Питома теоретична робота компресорів

$$w_k = h_2 - h_1 = 426 - 347 = 79 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Питома теплове навантаження на конденсатор:

$$w_{\text{конд}} = h_2 - h_{3a} = 426 - 263 = 163 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Об'ємна витрата компресорів

$$V_h = q_m v_1 = 0,857 \cdot 0,1382 = 0,1184 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Холодильний коефіцієнт циклу холодильної машини

$$\varepsilon = \frac{h_{1a} - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{347 - 263}{426 - 347} = 1,06$$

Необхідно визначити реальну об'ємну продуктивність поршневих компресорів, де λ об'ємний коефіцієнт подачі компресора.

$$V = \frac{V_h}{\lambda}$$

Об'ємний коефіцієнт подачі визначається, як:

$$\lambda = \lambda_i \lambda_\omega$$

λ_i – індикаторний об'ємний коефіцієнт подачі компресора

λ_ω – коефіцієнт нагрівання

$$\lambda_i = \frac{P_0 - \Delta p_0}{P_0} - c_k \left(\left(\frac{P_k + \Delta p_k}{P_0} \right)^{\frac{1}{n}} - \frac{P_0 - \Delta p_0}{P_0} \right)$$

$$c_k = 0,03$$

- показник політропи розширення для аміаку

$$n = 1,1$$

- Приймаємо депресію на нагнітанні та на всмоктуванні

$$\Delta p_0 = 0,05 \cdot 140\,800 \text{ Па}$$

$$\Delta p_k = 0,15 \cdot 2\,108\,000 \text{ Па}$$

$$\lambda_i = \frac{140\,800 - 7040}{140\,800} - 0,03 \left(\left(\frac{2\,108\,000 + 316\,200}{140\,800} \right)^{\frac{1}{1,1}} - \frac{380\,000 - 7040}{140\,800} \right) = 0,631$$

$$\lambda_\omega = \frac{t_0 + 273 \text{ }^\circ\text{C}}{t_k + 273 \text{ }^\circ\text{C}} = \frac{-40 + 273 \text{ }^\circ\text{C}}{45 + 273 \text{ }^\circ\text{C}} = 0,733$$

					<i>KP 000.142.003.006.2024.P13</i>	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Розраховуємо об'ємний коефіцієнт:

$$\lambda = \lambda_i \cdot \lambda_\omega = 0,631 \cdot 0,733 = 0,463$$

Визначаємо розрахункову «реальну» об'ємну продуктивність компресорів:

$$V = \frac{V_h}{\lambda} = \frac{0,1184}{0,463} = 0,2557 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Потужність, що споживається електродвигуном компресора розраховуємо за формулою:

$$N_{\text{електрична}} = \frac{N_{\text{ефективна}}}{\eta_{\text{електродвигуна}} \cdot \eta_{\text{передачі}}}$$

$$N_{\text{ефективна}} = N_{\text{тертя}} + N_{\text{індикаторна}}$$

$$N_{\text{тертя}} = V_h \cdot p_{\text{тр}}$$

$$p_{\text{тр}} = 0,083 \text{ МПа}[5]$$

$$N_{\text{індикаторна}} = \frac{N_{\text{теоретична}}}{\eta_i}$$

$$\eta_i = \lambda_\omega + b \cdot t_0$$

$$N_{\text{теоретична}} = q_m \cdot w_h = 0,857 \cdot 76 = 65,132 \text{ кВт}$$

$$\eta_i = \lambda_\omega + b \cdot t_0 = 0,733 + 0,0025 \cdot (-40) = 0,633$$

$$b = 0,0025 \text{ для хладонових компресорів [5]}$$

Визначаємо індикаторну потужність електродвигунів

$$N_{\text{індикаторна}} = \frac{N_{\text{теоретична}}}{\eta_i} = \frac{65,132}{0,633} = 102,89 \text{ кВт}$$

$$N_{\text{тертя}} = V_h \cdot p_{\text{тр}} = 0,1184 \cdot 83\,000 = 9,827 \text{ кВт}$$

$$N_{\text{ефективна}} = N_{\text{тертя}} + N_{\text{індикаторна}} = 9,827 + 102,89 = 112,7 \text{ кВт}$$

$$N_{\text{електрична}} = \frac{N_{\text{ефективна}}}{\eta_{\text{електродвигуна}} \cdot \eta_{\text{передачі}}} = \frac{112,7}{0,85 \cdot 0,98} = 147,36 \text{ кВт}$$

$\eta_{\text{електродвигуна}} = 0.85$ – Приймаємо середній ККД компресорного електродвигуна

За допомогою Bitzer SoftWare обираю необхідні мені компресори. Підбір здійснюю за об'ємною витратою компресорів. В схемі використовуємо два напівгерметичних компресори. Підібрав два напівгерметичних компресори 8FE-60Y. З об'ємною витратою холодильного агента:

					<i>KP 000.142.003.006.2024.P13</i>	Арк
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V_h = 0,1227 \frac{\text{M}^3}{\text{c}}$$

Reciprocating Compressors, Semi-Hermetic

Mode: Refrigeration and Air conditioning
 Refrigerant: R507A
 Reference temperature: Dew point temp.
 Compressor type: Single Compressor
 Series: Standard
 Motor version: all

Compressor selection
 Cooling capacity: 35 kW
 Compressor model: 8FE-60Y Incl. former types

Operating point
 Evaporating SST: -40 °C
 Condensing SDT: 45 °C

Operating conditions
 Liq. subc. (in condenser): 0 K
 Suction gas temperature: 20 °C
 Useful superheat: 100 %
 Operating mode: Auto

8FE-60Y

Technical Data

Displacement (1450 RPM 50Hz)	221 m³/h
Displacement (1750 RPM 60Hz)	266,7 m³/h
No. of cylinder x bore x stroke	8 x 82 mm x 60 mm
Weight	361 kg
Max. pressure (LP/HP)	19 / 28 bar
Connection suction line	76 mm - 3 1/8"
Connection discharge line	54 mm - 2 1/8"
Oil type R134a/R407C/R404A/R507A/R407A/R407F	BSE32(Standard) R134a tc>70°C: BSE55 (Option)
Oil type R22 (R12/R502)	B5.2 (Option)

Motor Data

Motor version	2
Motor voltage (more on request)	380-420V PW-3-50Hz
Max operating current	113.0 A
Winding ratio	60/40
Starting current (Rotor locked)	349.0 A D / 513.0 A DD

Рис. 4.3 Результати підбору напівгерметичних компресорів у ПЗ Bitzer Software

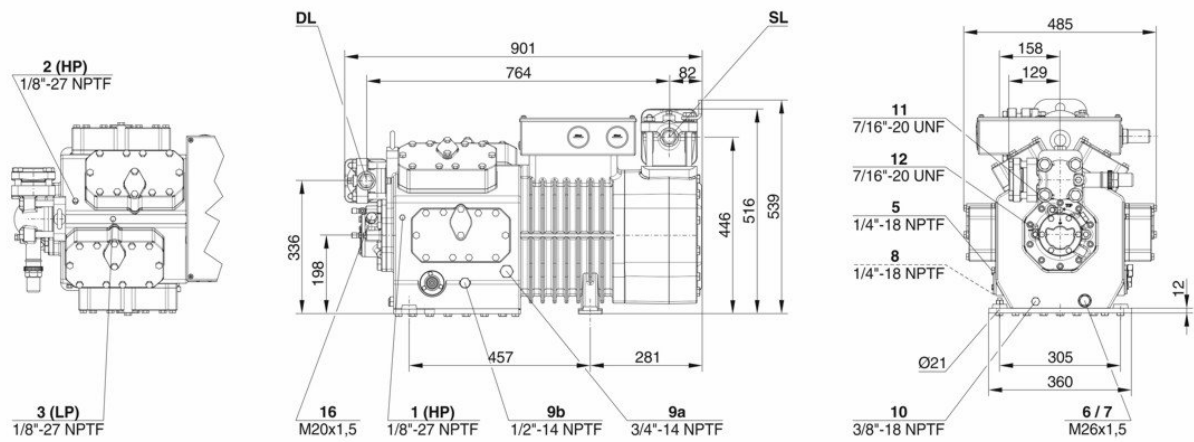


Рис. 4.5 Габаритні розміри та підключення до компресору 8FE-60Y

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

КР 000.142.003.006.2024.ПІЗ

Арк

33

4.1 Розрахунок та вибір конденсатора

Визначаємо необхідно теоретичну потужність конденсатора за формулою:

$$Q_{\text{конд}} = w_{\text{конд}} \cdot q_m = 163 \cdot 0,857 \approx 140 \text{ кВт}$$

Виконую підбір повітряного конденсатора з бма вентиляторами від українського виробника SpecialeCoils.

Потужність конденсатору складає понад 165 кВт при температурі конденсації холодильного агенту 45 °С та $\Delta T = 10\text{K}$.

Маса повітряного конденсатору складає – 600 кг.

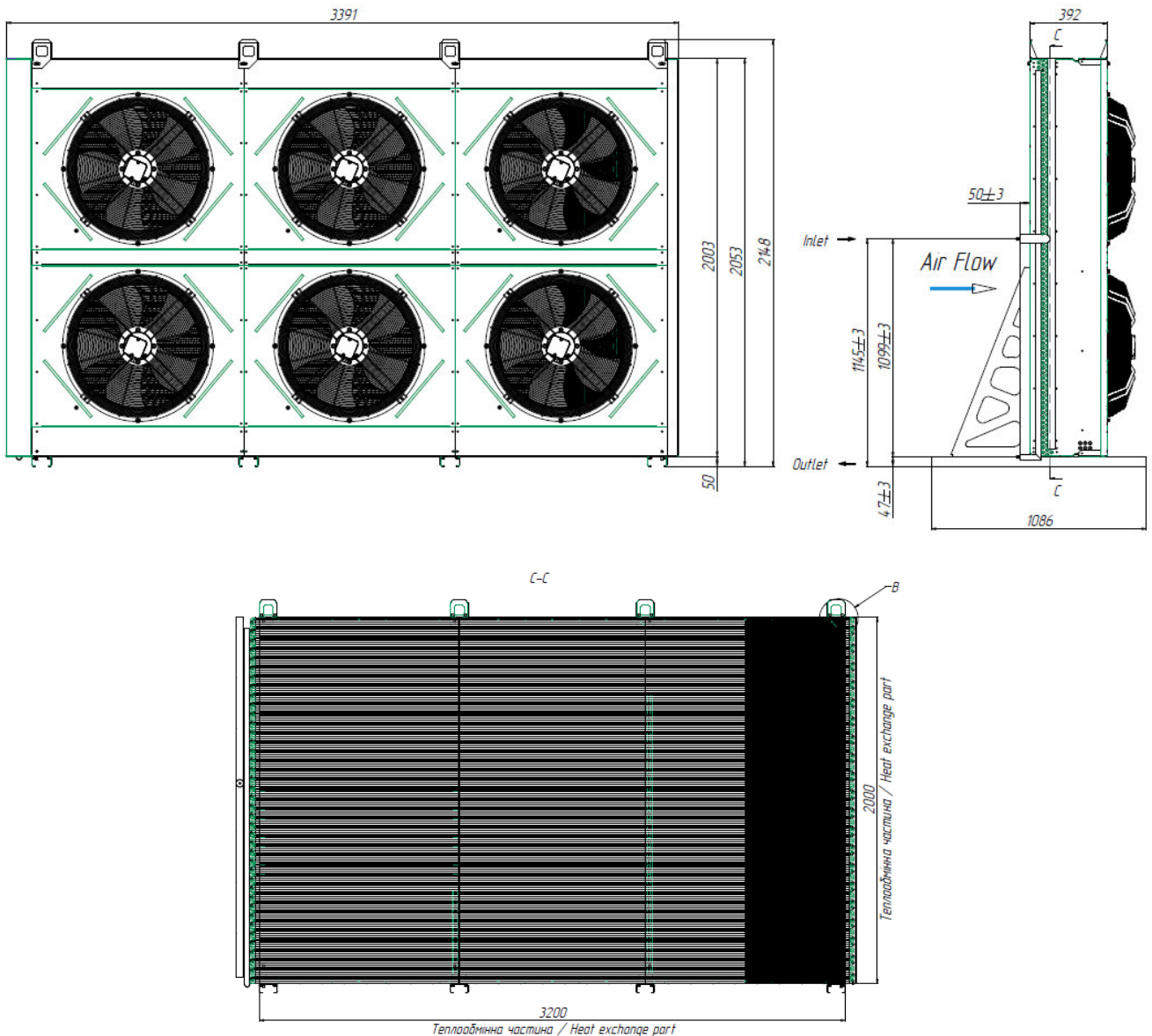


Рис. 4.1.1 Габаритні розміри конденсатора CUS 165 kW (6x630 mm)

				КР 000.142.003.006.2024.РІЗ		
	№ докум.	Підпис		Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив	Д.М. Ніколасць		Аналіз методів розрахунку процесу заморожування зеленого горошку в флюїдизаційному швидкокоморозильному апараті		34	40
Перевір.	М.М. Масліков			TEXT HНІТІ НУХТ		
Реценз.						
Н. контр.						
Затверд.	М.О. Прядко					

5. Розрахунок трубопроводів

Проводимо розрахунок діаметру трубопроводу ОХМ за наступною формулою:

$$d = \sqrt{\frac{4q_m}{\pi\rho\omega}}$$

ρ – щільність холодоагенту, кг

ω – швидкість холодоагенту (довідкове значення табл.5.1), м/с

Лінія	Швидкість, м/с
Всмоктування	8 – 12
Нагнітання	10 – 18
Рідинна	1 – 1,25

Табл.5.1 Рекомендована швидкість холодоагенту у трубопроводі

Діаметр лінії всмоктування трубопроводу на компресорах

$$d_{\text{вс}} = \sqrt{\frac{4q_m}{\pi \frac{1}{v} \omega}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,429}{3,14 \cdot \frac{1}{0,138} \cdot 8,5}} = 76 \text{ мм}$$

Діаметр лінії всмоктування трубопроводу, колектор

$$d_{\text{вс}} = \sqrt{\frac{4q_m}{\pi \frac{1}{v} \omega}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,857}{3,14 \cdot \frac{1}{0,138} \cdot 8,5}} = 108 \text{ мм}$$

Діаметр лінії нагнітання трубопроводу на компресорах

$$d_{\text{наг}} = \sqrt{\frac{4q_m}{\pi \frac{1}{v} \omega}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,429}{3,14 \cdot \frac{1}{0,01126} \cdot 10}} = 28 \text{ мм}$$

Діаметр лінії нагнітання трубопроводу, колектор

$$d_{\text{наг}} = \sqrt{\frac{4q_m}{\pi \frac{1}{v} \omega}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,429}{3,14 \cdot \frac{1}{0,01126} \cdot 10}} = 35 \text{ мм}$$

КР 000.142.003.006.2024.РПЗ				
	№ докум.	Підпис		
Розробив	<i>Д.М. Ніколасць</i>		Аналіз методів розрахунку процесу заморожування зеленого горошку в флюїдизаційному швидкокоморозильному апараті	
Перевір.	<i>М.М. Масліков</i>			
Реценз.				
Н. контр.				
Затверд.	<i>М.О. Прядко</i>			
		Літ.	Арк.	Аркушів
		35	40	40
<i>TEXT ННІТІ НУХТ</i>				

Діаметр рідинної лінії, колектор

$$d_{\text{рід}} = \sqrt{\frac{4q_m}{\pi \frac{1}{\nu} \omega}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,857}{3,14 \cdot \frac{1}{0,001} \cdot 2}} = 23 \text{ мм, приймаємо } 22 \text{ мм}$$

					<i>КР 000.142.003.006.2024.РПЗ</i>	Арк
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.1 Підбір допоміжного обладнання

За допомогою ПЗ Danfoss Cool Selector проводжу підбір допоміжного обладнання, а саме:

- Регулятор тиску конденсації
- Оглядове скільце
- Електронний регулюючий вентиль
- Запірна арматура відповідно до розрахункових діаметрів

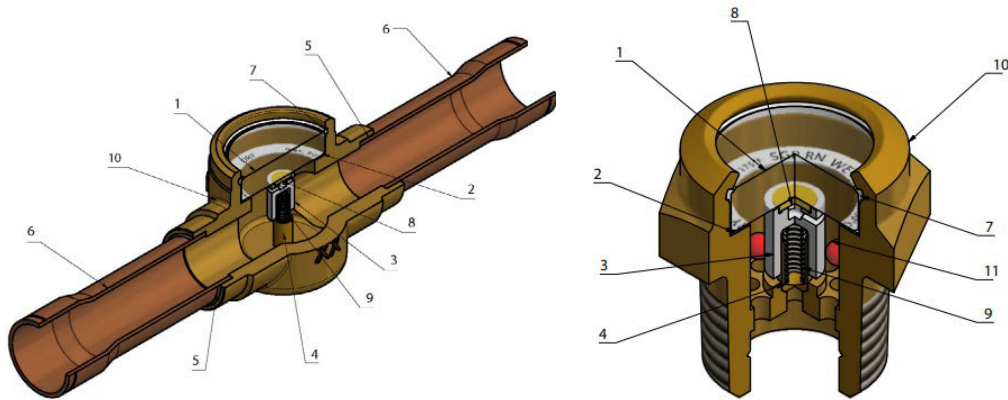


Рис.5.1.1 Графічне зображення оглядового скільця серії SGP

Обираю оглядова скільце з номінальним діаметром 12 мм та врізаю паралельно в рідинну лінію для контролю заповненню системи холодоагентом та з метою контролю наявності вологи у системі. Оскільки у скільце вмонтований індикатор вологості.

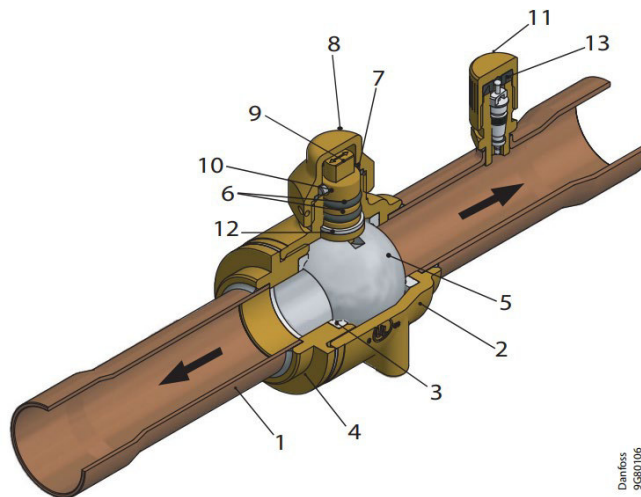


Рис.5.1.2 Графічне зображення запірного вентиля серії GBC

Обираємо запірні шарові вентиля для кожного розрахунково діаметру.

				<i>КР 000.142.003.006.2024.РПЗ</i>			
	№ докум.	Підпис		Аналіз методів розрахунку процесу заморожування зеленого горошку в флюїдизаційному швидкоморозильному апараті	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив	<i>Д.М. Ніколасць</i>					37	40
Перевір.	<i>М.М. Масліков</i>				<i>TEXT ННІТІ НУХТ</i>		
Реценз.							
Н. контр.							
Затверд.	<i>М.О. Прядко</i>						

№	Діаметр	Обрана модель
1	76 мм	GBC 79s v2
2	108 мм	SVA 125 straight
3	28 мм	GBC 28s v2
4	35 мм	GBC 35s v2
5	22 мм	GBC 22s v2

Табл. 5.1.1 Обрані запірні вентилялі

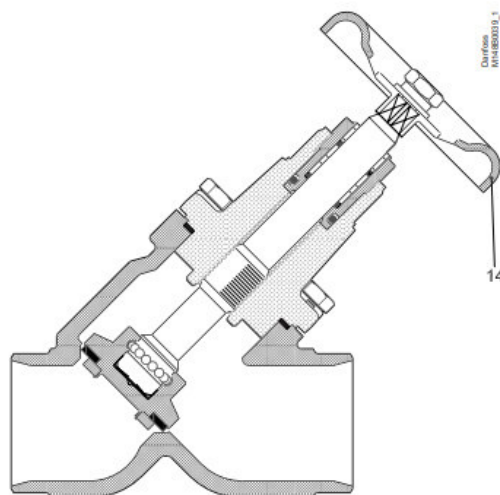


Рис. 5.1.3 Запірний вентиль SVA 125 straight на лінію всмоктування

Регулятором конденсації тиску обираю модель з серії ICM, а саме ICM 40-А.

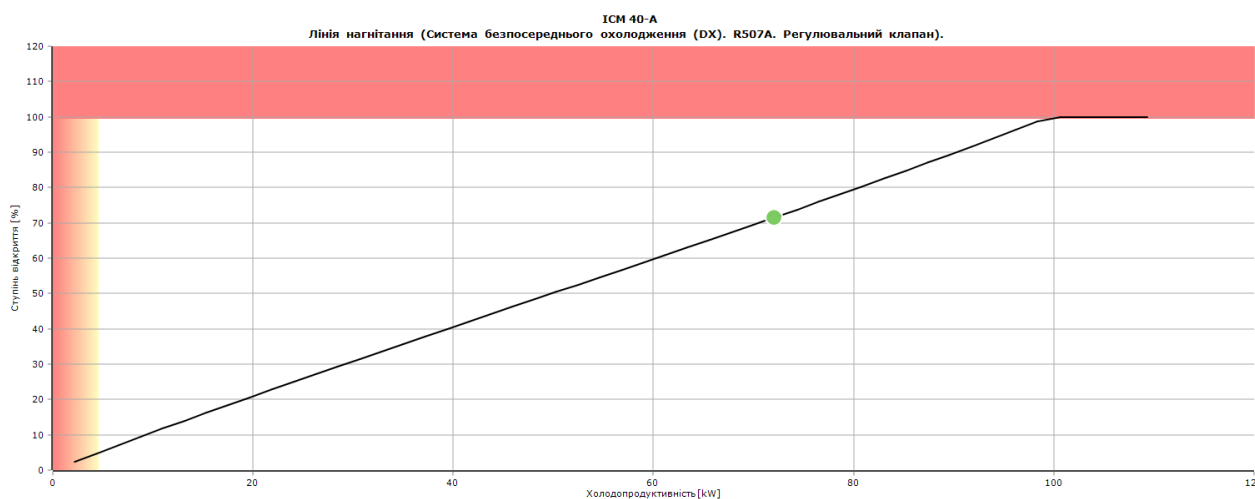


Рис.5.1.4 Результати підбору регулятора тиску конденсації ICM 40-А

Регулюючий вентиль будемо встановлювати на кожен з 6 випарників. Використовувати будемо електронні регулюючі вентилялі серії АКВ. Обрали АКВ 15-1.

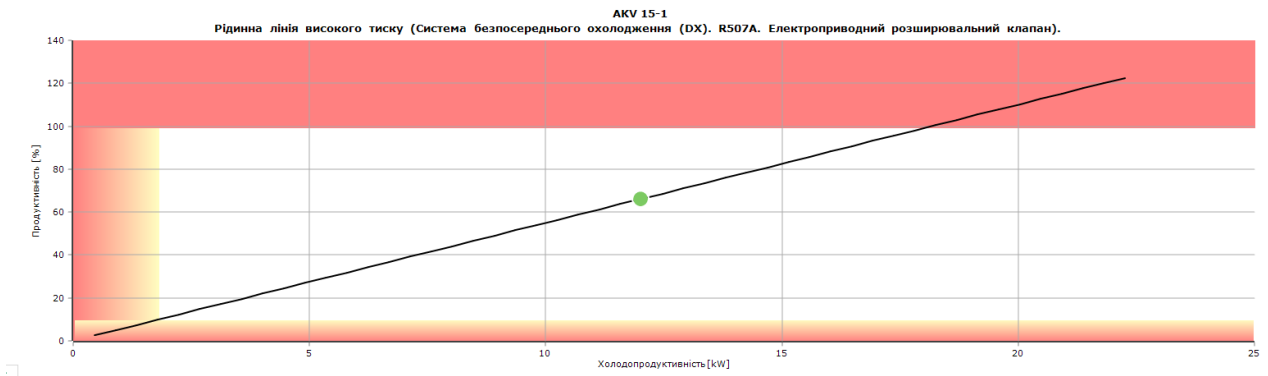


Рис.5.1.4 Результати підбору електронного регулюючого вентиляю АКВ 15-1

					<i>КР 000.142.003.006.2024.РПЗ</i>	Арк
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Використані джерела

[1] Бараненко А.В. Приклади та задачі по холодильній технології харчових продуктів, стр. 37

[2] Бараненко А.В. Приклади та задачі по холодильній технології харчових продуктів, стр. 37, форм. 2.6

[3] Бараненко А.В. Приклади та задачі по холодильній технології харчових продуктів, стр. 37, додаток 18

[4] Бараненко А.В. Приклади та задачі по холодильній технології харчових продуктів, стр. 172

[5] Теплохолодотехніка Сергій Василенко, Володимир Павелко, Наталія Іващенко, Світлана Барановська, Андрій Форсюк, Максим Масліков, стр. 154

[6] <http://www.jagodnik.info/2021-roku-ukrayina-eksportovala-rekordnu-kilkist-zmorozhenyh-yagid/>

					<i>КР 000.142.003.006.2024.РПЗ</i>		
		№ докум.	Підпис				
Розробив	<i>Д.М. Ніколасць</i>			Аналіз методів розрахунку процесу заморожування зеленого горошку в флюїдизаційному швидкоморозильному апараті	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	<i>М.М. Масліков</i>					40	40
Реценз.					<i>ТЕХТ ННІТІ НУХТ</i>		
Н. контр.							
Затверд.	<i>М.О. Прядко</i>						