

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Кухаренко В.М.

Рідкий лід та холодильні технології
Навчально-методичний посібник

Затверджено
Редакційно-видавничою
Радою НТУ «ХП»
Протокол № 3 від 10.10.18 р.

Харків
2019

УДК 621.565.9

За підтримки громадської організації «Холодильна асоціація України».

Рецензенти:

Г.Г. Жунь доктор технічних наук, професор кафедри технічної кріофізики Національного технічного університету «ХПІ»

О.В. Потапов Завідувач кафедри підготовки та перепідготовки фахівців холодильної та торгівельної галузі, д.т.н., професор Харківського державного університету харчування та торгівлі

В.М. Кухаренко

К 95.Рідкий лід та холодильні технології: навчально-методичний посібник / В. М. Кухаренко, – Харків, ХПІ : 2019. – 132 с.

ISBN 978-617-619-232-9

Розкрито причини появи нового теплоносія, що впливає на економію енергоресурсів - рідкого льоду (айс-сларі). Ця сучасна технологія дозволяє приблизно вдвічі зменшити енерговитрати у сучасних холодильних системах. У роботі наведено залежності для розрахунку теплофізичних характеристик флюїдизованого льоду та розглянуто генератор для його отримання. Створено математичну модель генератора з флюїдизованим шаром і проведено порівняльний аналіз двох холодильних контурів для айс-сларі та холодоносія CaCl_2 . Розглянуто питання сучасного проектування нової техніки.

Призначено для магістрів, аспірантів вищих навчальних закладів.

Іл.. 52. Табл. 15. Бібліогр. 40 назв.

ISBN 978-617-619-232-9

УДК 621.565.9

© В. М. Кухаренко 2019

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

a_w – активність води

C – концентрація солі у розчині

c_p – теплоємність (Вт/кгК)

D, d – діаметр труби (м)

d_e – еквівалентний діаметр (м)

G – масова витрата (кг/с)

F – сила (Н)

H – висота шару (м)

h – ентальпія (Дж/кг)

g – прискорення вільного падіння (м/с²)

k – коефіцієнт теплопередачі (Вт/м²К)

L – довжина труби (м)

M_v – молярна маса (кг/моль)

m – масовий потік (кг/м²с)

p – тиск (Па)

Q – теплота, холодопродуктивність (Вт)

q – тепловий потік (Вт/м²)

R – універсальна газова стала (Дж/мольК)

S – площа (м²)

T – температура (К)

V – об'єм (м³)

V_q – об'єм сталевої частинки (м³)

u_s – поверхнева швидкість рідини (м/с)

w – масова концентрація льоду (%)

α – коефіцієнт тепловіддачі (Вт/м²К)

γ – кут зсуву

$\bar{\gamma}$ – об'ємний тепловий коефіцієнт розширення (К⁻¹)

ΔH – теплота фазового переходу (Дж/кг)

δ – товщина (м)

ε - порізнєність шару

f – фактор тертя

ζ – коефіцієнт опору

λ – коефіцієнт теплопровідності (Вт/мК)

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості (Н.с/м²)

ρ – густина (кг/м³)

τ – напруга тертя

v – швидкість потоку (м/с)

ІНДЕКСИ

cf – розчин

e – етанол

i – лід

is – айс-сларі

L – ламінарний

l – розчин

rp - розчин

T – турбулентний

tv – сталева частинка

$wall$ – стінка

БЕЗРОЗМІРНІ ЧИСЛА

Ar – число Архімеда

Gr – число Грасгофа

Gz – число Гретца

Nu – число Нуссельта

Pr – число Прандтля

Re – число Рейнольдса

St – число Стентона

ВСТУП

За теперішнього часу сфера застосування холоду постійно розширюється, тому питання споживання його завжди будуть актуальні. В результаті цього кількість холодильної техніки, що випускається, також постійно збільшується. Проте таке зростання має здійснюватися не тільки на підставі старих методик, воно потребує постійного пошуку нових. У зв'язку з цим застосування в холодильній промисловості водольодяних сумішей (айс-сларі (ice-slurry), рідкий лід, флюїдизований лід і т. д.) є перспективним напрямом.

Айс-сларі отримують з морської води, водних розчинів солей, гліколів або спиртів.

Застосування водольодяної суміші забезпечує ефективність і високі енергетичні показники системи безпосереднього охолодження. Все це ґрунтується на використанні достатньо простої в обслуговуванні, відомої і екологічно безпечної речовини – води. При використанні флюїдизованого льоду енергетичні можливості системи збільшуються у декілька разів порівняно з використанням звичайних холодоносіїв.

Системи охолодження айс-сларі використовуються в багатьох будівлях по всьому світу для кондиціонування повітря. В більшості випадків система виробництва флюїдизованого льоду об'єднується із системою зберігання для зняття пікових навантажень.

Система кондиціонування повітря на основі айс-сларі зазвичай використовує три незалежні кругообіги: освіжаючий кругообіг; кругообіг між генератором айс-сларі, танком і теплообмінником; кругообіг між системою айс-сларі і об'єктом охолодження. Альтернативою може бути подача крижаного розчину від танка безпосередньо до об'єкта.

Одне із застосувань розподіленої системи айс-сларі – система кондиціонування повітря будівлі CAPCOM (20 поверхів загальною площею 16 784 м²) в м. Осака (Японія), що була побудована в 1996 р. [3]. Застосування

водокрижаної суміші дозволило проектувальникам системи кондиціонування повітря використовувати нижчу температуру 12°C замість 15°C , прийняту як стандартну в Японії. Це дозволило зменшити об'ємну питому витрату з 41 до $32 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{год})$.

Установка айс-сларі приводить до зменшення енерговитрат на 25 мВт.ч, що складає 4 % від загального споживання енергії споруди.

Інший комерційний приклад - споруда Осаки Herbis (Японія), побудована в лютому 1997. Її висота 181 м і загальна площа $136\,823 \text{ м}^2$.

Установка включає 31 генератор льоду потужністю 260 мВт.год кожний і 16 крижаних танків зберігання об'ємом 70 та 140 м^3 , із загальною тепловою ємністю 80 750 мВт.ч. Це дозволило 60 % повного енергоспоживання здійснити за нічним тарифом, що призвело до істотних заощаджень у експлуатаційних витратах.

Айс-сларі застосовується для зберігання продовольчих продуктів протягом транспортування та продажу. Також флюїдизований лід забезпечує швидке охолодження овочів і риби шляхом їх занурення у водокрижану суміш, а також обробку м'яса і молочних продуктів, зберігання їжі.

Водольодяна суміш - чудове середовище для охолодження свіжої риби. У системі айс-сларі риба повністю вкрита рідким розчином. Як наслідок, риба охолоджується швидше, а зростання бактерій уповільнюється. Результати показують, що час, необхідний для охолодження у такий спосіб камбали до 2°C втричі менший, ніж при охолодженні звичайним льодом.

Заводи охолодження риби за допомогою водокрижаної суміші є в багатьох країнах. Приклад подібного підприємства - Harris в Шотландії. Система складається з вузла отримання айс-сларі на 10 кВт і 6 м^3 танків зберігання, що містять морську воду. Охолоджена морська вода застосовується для зберігання живих креветок в танках. Швидке охолодження морської води в танку до 8°C забезпечується системою айс-сларі через теплообмінник. Після цього температура зменшується до 4°C дещо повільніше. Генератор айс-сларі на 10 кВт і ємність резервуара можуть забезпечити пікове охолодження 47 кВт.

Генератор айс-сларі для обробки сиру встановлений на заводі в Ханфорді (Каліфорнія, США), на молочній фабриці з щоденним виробництвом 90 000 кг сиру чеддер [4]. Система водокрижаної суміші складається з крижаного генератора холодопродуктивністю 106 кВт і резервуарів зберігання ємністю 24,6 м³, здатних зберігати 763 кВт год енергії. Генератор айс-сларі працює безперервно і виготовляє айс-сларі крижаної концентрації 5-10 % з 7 % розчину пропіленгліколю.

Використання флюїдизированого льоду як холодоносія в продовольчих магазинах може зменшити навантаження на основну систему, не збільшуючи повної витрати енергії через зменшення кількості рідкого розчину у вторинному контурі.

Відповідно до оцінки вартість системи айс-сларі на 89 % вища за звичайну систему. Окрім цього, споживання енергії збільшується на 3,5 %, але вона в змозі перекрити 80 % споживання енергії у годину пік, що заощаджує 49 % витрат електрики при терміні окупності 4,4 роки.

Схема системи айс-сларі для зберігання свіжих продуктів фірми Deerchill™ наведена на рис. 1. Кристали льоду з верхньої частини резервуара, змішані з невеликою кількістю води, подаються насосом до вітрин гнучким брандспойтом.

У багатьох промислових установках труби і теплообмінники потребують частого і ефективного внутрішнього очищення. Цей процес найчастіше досягається механічними методами. Проте механічне очищення не може бути виконаним у каналах зі складною геометрією. Експериментальна і теоретична робота, виконана в Брістольському університеті, довела можливість використання флюїдизованого льоду для очищення каналів складної конфігурації. Експерименти проводилися з розчином солі або цукру, що містив 10 % льоду. Забруднення поверхні включало джем, жири (харчова промисловість), зубну пасту (фармацевтичний продукт).

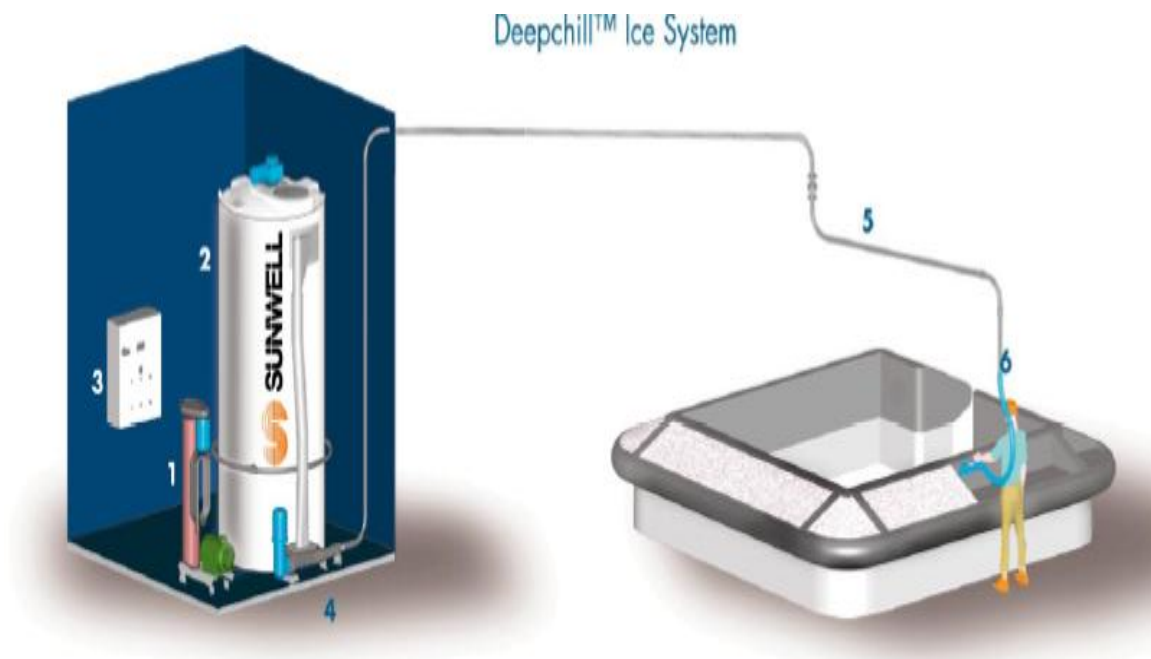


Рис 1. Система Deepchill™

Також айс-сларі застосовують в медицині – для подавання спеціального розчину до артерій, яремних вен і легенів з метою створення локальної гіпотермії. Окрім того, водокрижані суміші застосовують для зменшення больових відчуттів при спортивних травмах.

Флюїдизований лід можна використовувати замість штучного снігу для лижного спорту.

Айс-сларі застосовують для гасіння пожеж. Порівняльний аналіз показав, що водольодяна суміш допомагає загасити вогонь вдвічі швидше і при менших витратах.

Переваги технології айс-сларі:

- 1) висока здатність до охолодження внаслідок використання теплоти фазового переходу;
- 2) малий діаметр для системи нагнітання;
- 3) низька енергія нагнітання;
- 4) спостерігається поліпшення якості виробництва холоду: підвищення стабільності підтримування температури, легке управління вологістю і процесами заморожування /розмороження;

- 5) зменшення обсягу споживання електроенергії внаслідок використання систем зберігання айс-сларі;
- 6) зменшення маси холодоагенту первинного циклу холодильної системи;
- 7) використання дешевої нічної електроенергії;
- 8) зростання пікового навантаження на холодильну систему.

Обмеження технології айс-сларі:

- 1) Додаткова енергія для перемішування айс-сларі в танку;
- 2) Додаткова система контролю якості айс-сларі [5].

Водольодяна суміш може містити домішки, що виконують такі функції:

1. Запобігають корозії. Якість дії залежить від типу температури замерзання. У закритих системах бажано видалити кисень, або повітря.
2. Запобігають скупченню кристалів або зміні їх розмірів при тривалому зберіганні айс-сларі (декілька годин). Цього можна добитися, використовуючи стабілізатори, наприклад білки, як антифриз, або інші макромолекули.

1. ВИБІР АЙС-СЛАРІ

Технологія айс-сларі (рідкий лід) була запропонована в Росії понад 90 років тому. Проте практичне її застосування почалося в Канаді і Німеччині, коли компанії стали виготовляти генератори айс-сларри для комерційного використання.

Айс-сларі – це крижані кристали, розподілені у воді або водному розчині, в який додаються різні речовини з метою :

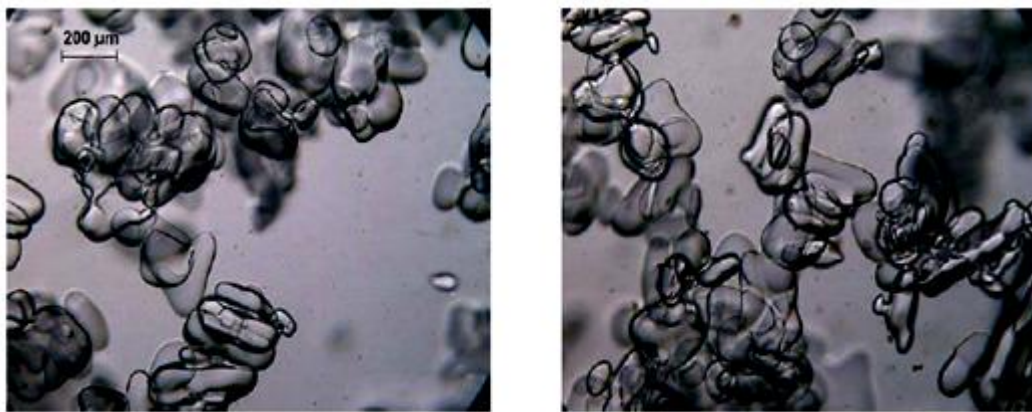
- 1) зменшення температури замерзання;
- 2) зменшення в'язкості густини;
- 3) збільшення теплопровідності рідкої фази;
- 4) зменшення корозійної дії;
- 5) запобігання скупченню кристалів.

Для отримання айс-сларі використовуються водні розчини етанолу, метанолу, етиленгліколю, пропіленгліколю, хлориду магнію, хлориду калію і т. ін [1].

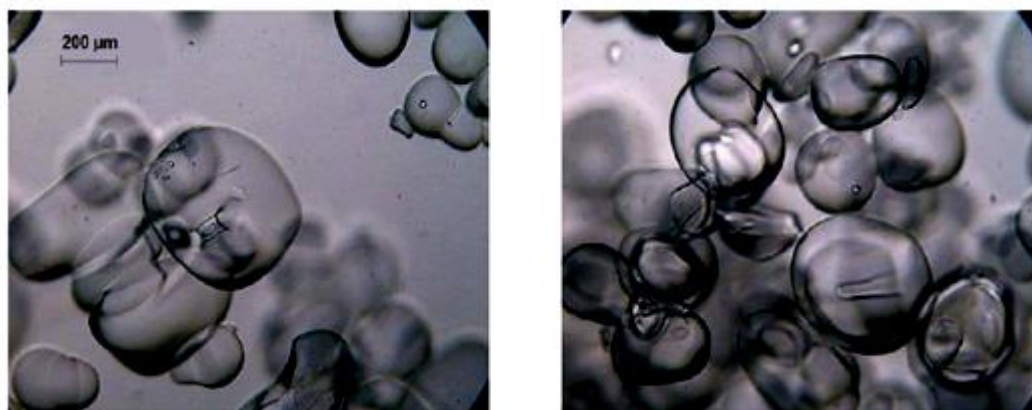
При зменшенні температури водних розчинів нижче температури замерзання з'являються мікроскопічні кристали льоду, які не заважають транспортуванню двофазної суспензії по трубопроводах.

Рідка фаза розділяє кристали льоду, дозволяючи уникнути утворення сніжних грудок. Розміри кристалів льоду в айс-сларі невеликі – від декількох мікронів до 450 мкм, частіше всього не більші 250 мкм. Це забезпечує можливість перекачувати суспензію, що містить аж до 60 % (за масою) льоду, і реалізовувати досить низькі температури, необхідні для холодильної техніки.

Мікроскопічні картини айс-сларі були отримані Кауффелдом для водного розчину $MgCl_2$ [6] і Фукузако для етиленгліколю. Знімки (1061 x 762 мкм), отримані Сарі (рис. 1.1), показують, що частинки мають приблизно еліпсоїдну форму. Середня довжина частинок 344 мкм, середня ширина 234 мкм, відношення ширини до довжини 0,68 [2].



приклад вільних льодяних кристалів



приклад льодяних кристалів після 15 годин зберігання

Рис. 1.1. Зміна розмірів частинок айс-сларі через 15 годин [6]

Частка льоду і розмір кристалів залежать від багатьох чинників, в першу чергу від досконалості конструкції льодогенератора, швидкості течії розчину, концентрації розчинених речовин, часу знаходження кристалів льоду в розчині, умов теплообміну і т. ін. Айс-сларі має високі коефіцієнти тепловіддачі через фазовий перехід – плавлення льоду. Із збільшенням частки льоду і швидкості руху холодоносія коефіцієнт тепловіддачі зростає. Вплив першого чинника більш значний.

1.1. Загальна характеристика депресантів

В наш час досліджено температури замерзання різних речовин, котрі використовуються для отримання айс-сларі. Деякі з них раніше застосовувалися в комерційних системах охолодження. Це хлорид натрію (NaCl) (в основному морська вода), етиловий спирт і етиленгліколь. Усі три речовини відносно недорогі і є простими у використанні. Окрім цих

депресантів використовуються інші, такі, як хлорид кальцію, пропіленгліколь, хлорид магнію, аміак і інші [6].

Точка евтектики обмежує застосування крижаних гідросумішей. Наприклад, хлорид натрію з точкою евтектики $-20,7^{\circ}\text{C}$ не може застосовуватися при температурі замерзання (температура використання -18°C).

На рис. 1.2 показано, як змінюється температура замерзання розчинів при різних концентраціях депресантів.

Депресант підбирається на підставі певних властивостей айс-сларі. Наприклад, вживання добавок, які мають високу точку замерзання при низьких концентраціях (хлорид літію) або відносно гладку криву замерзання, приведе до того, що збільшення числа крижаних кристалів мало вплине на зменшення температури.

Депресанти можуть бути розділені на дві групи: неорганічні і органічні.

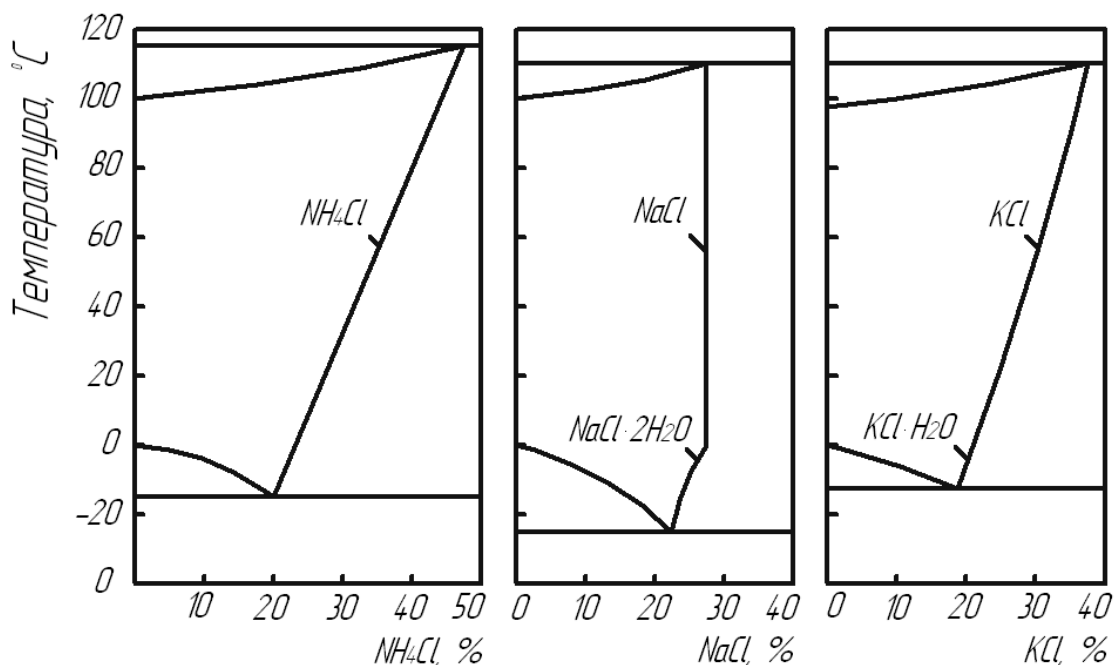


Рис. 1.2. Залежність температури замерзання розчинів при різних концентраціях депресантів

1.2. Органічні депресанти

Органічні депресанти повинні бути повністю водорозчинними і мати відносно низьку в'язкість. Як органічні сполуки використовуються спирти і полімасла.

Етиловий спирт використовується тільки для замкнених систем, через свою леткість. У відкритих системах етанол випаровується з айс-сларі, внаслідок чого зменшується температура замерзання. Через те що етиловий спирт має низьку температуру кипіння і запалення, може виникнути небезпека для людини. Проте це відбувається при більш високих його концентраціях, у порівнянні зі звичайно використовуваними в айс-сларі. Розчини етилового спирту мають низьку густину і відносно високу в'язкість при низьких температурах.

Розчини метанолу мають більш низьку в'язкість, ніж етиловий спирт, але він також небезпечний при випаровуванні з системи, оскільки містить більше отруйних речовин, ніж етанол.

Як органічні депресанти використовуються й інші спиртові розчини: етиленгліколь, пропіленгліколь і т. д.

1.3. Неорганічні депресанти

Неорганічні депресанти, або солі, що використовуються в айс-сларі, повністю розчиняються в розчині. Густина неорганічних розчинів вища, ніж густина органічних. Неорганічні добавки звичайно більш корозійні, ніж органічні, і тому виникають проблеми щодо їх сумісності матеріалу. Хлорид натрію широко застосовується як депресант для айс-сларі. NaCl має високу теплопровідність, високу густину і відносно малу в'язкість. Проте у нього є істотний недолік – NaCl є сильним окислювачем металів (викликає корозію).

Аміак також може використовуватися як депресант. Так само він використовується як первинний холодоагент, але оскільки він є екологічно небезпечним, - це стає однією з головних причин встановлення вторинної системи. Аміак має сильний запах і є отруйним. Він має низьку точку кипіння.

Невеличкі концентрації, які зазвичай застосовуються в домашньому господарстві для очищення виробів, є відповідними для зниження температури замерзання айс-сларі. Але вторинна система, котра використовує аміак, все-таки вимагає обережності, оскільки існує небезпека отруєння [6].

Також як добавку для зменшення температури замерзання розчину можна використовувати хлорид калію, карбонат калію, хлорид амонію та інші.

1.4. Депресія точки замерзання

Визначення концентрації льоду і ентальпії розчину розглянуто в роботі [1, 6]. Рисунок 1.3 показує, як температура замерзання розчину залежить від складу суміші. Збільшення концентрації домішки (солі, органічні речовини) знижує температуру замерзання. Це продовжується аж до точки евтектики, надевтектична частина кривої точки замерзання не використовується.

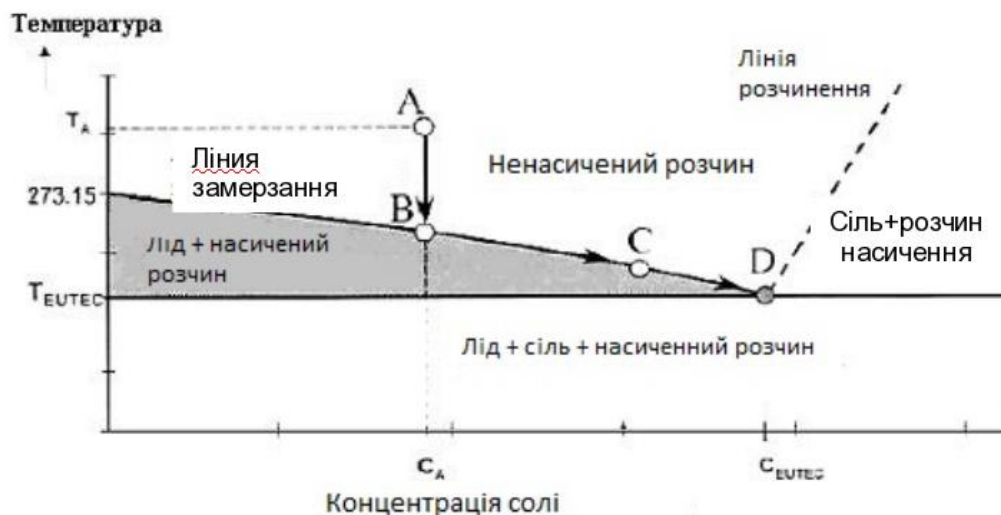


Рис. 1.3. Діаграма точки замерзання

На рис. 1.4 показані криві точки замерзання від концентрації різних розчинів.

Розглянемо розчин з концентрацією солі w_0 , який охолоджується від температури A до точки замерзання B і нижче. Якщо температура нижча, ніж точка замерзання, і процес зрівноважений, то відбувається розділення суміші. Крижані кристали (чиста вода) відокремлюються від решти розчину, який стає більш концентрованим. Концентрація розчину, що залишається, визначається з

балансу маси за умови, що суміш містить незмінну кількість солі. Позначимо масу чистого льоду через m_i а масу розчину з концентрацією w_s через m_s . Тоді кількість солі $m_s w_s$. У початковому розчині кількість солі $w_s(m_i + m_s)$. Оскільки кількість солі не змінилася, з цього виходить, що $m_s w_s = w_o(m_i + m_s)$, або $m_s(w_s - w_o) = m_i \cdot w_o$. Концентрація льоду w_i , може тоді легко бути обчислена:

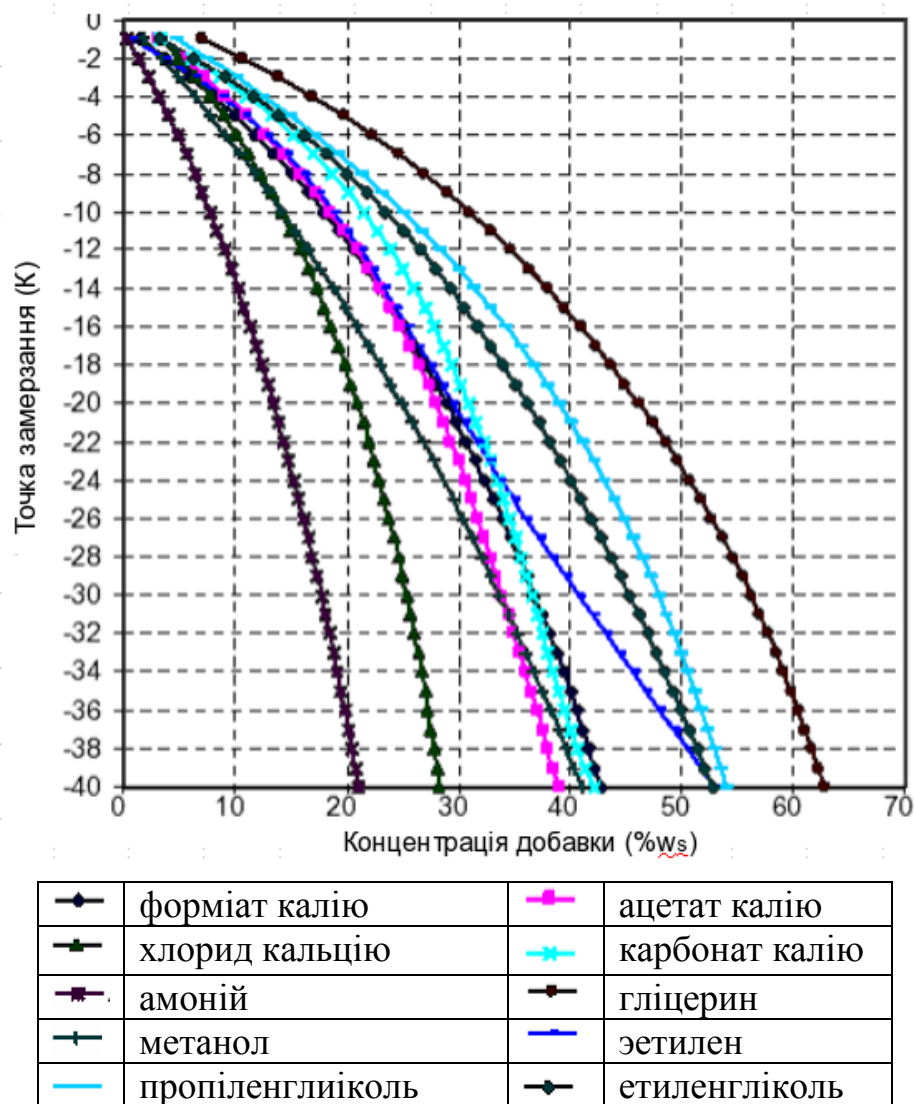


Рис. 1.4. Точка замерзання [°C]

$$w_i = m_i / (m_i + m_s) = (w_s - w_o) / w_s. \quad (1.1)$$

Щоб застосовувати айс-сларі в температурному діапазоні від 0 °C - -30 °C, додають антифриз. Для термодинамічної оцінки депресії точки замерзання використовується теорія ідеального розчину.

Якщо розчин знаходиться в рівновазі при температурі замерзання, хімічний потенціал води дорівнює хімічному потенціалу льоду μ_i^* :

$$\mu_i^* = \mu_w^* . \quad (1.2)$$

Хімічний потенціал води визначається активністю води:

$$\mu_i^* = \mu_w^o + RT_f \ln a_w . \quad (1.3)$$

Активність води в розчині a_w залежить від концентрації антифризу:

$$a_w = \frac{1}{1 + \frac{w_{fpd} \cdot M_w}{(1 - w_{fpd}) \cdot M_{fpd}}} . \quad (1.4)$$

За допомогою залежності (1.4) можемо визначити величину a_w для будь-якого антифризу.

Для солей, які дисоційовані в розчині, використовуються молекулярні маси і концентрації іонів в розчині (1.4).

З виразу (1.2) випливає, що зміна енергії Гібса дорівнює нулю:

$$\Delta G_f = \Delta H_f - T_f \cdot \Delta S_f = 0 \quad (1.5)$$

$$\text{З виразу } \left(\frac{\partial \mu}{\partial T} \right)_p = -S \quad (1.6)$$

можна отримати рівняння для визначення температури замерзання:

$$T_f = \frac{1}{\frac{1}{T_0} - \frac{R \cdot \ln a_w}{M_w \cdot \Delta \bar{H}_f}} , \quad (1.7)$$

в якому T_0 - температура замерзання води 273,15K, ΔH_f слабо залежить від температури, тому можна використовувати середнє значення теплоти фазового переходу (1.7) [6, 7].

Приклад 1

Необхідно визначити активність води в розчині NaCl і температуру

його замерзання, якщо концентрація антифризу складає 10 %:
 $M_w=0,0585$ кг/моль – молярна маса NaCl; $M_{fd}=0,018$ кг/моль – молярна маса
 води; $\Delta \bar{H}_f=332400$ Дж/кг – теплота фазового переходу;
 $R=8,314$ Дж/(моль•К) – універсальна газова стала.

Розв'язання

Активність води в розчині визначаємо, використовуючи залежність (1.4):

$$a_w = \frac{1}{1 + \frac{0,1 \cdot 18}{(1 - 0,1) \cdot 58,5}} = 0,967 .$$

Температура замерзання розчину при такій концентрації антифризу становить:

$$T_f = \frac{1}{\frac{1}{273,15} - \frac{8314 \cdot \ln 0,967}{18 \cdot 332400}} = 269,7 \text{ К}.$$

Застосування залежностей (1.4) та (1.7) на практиці для NaCl дає нам результати, наведені на рис. 1.5 та 1.6.

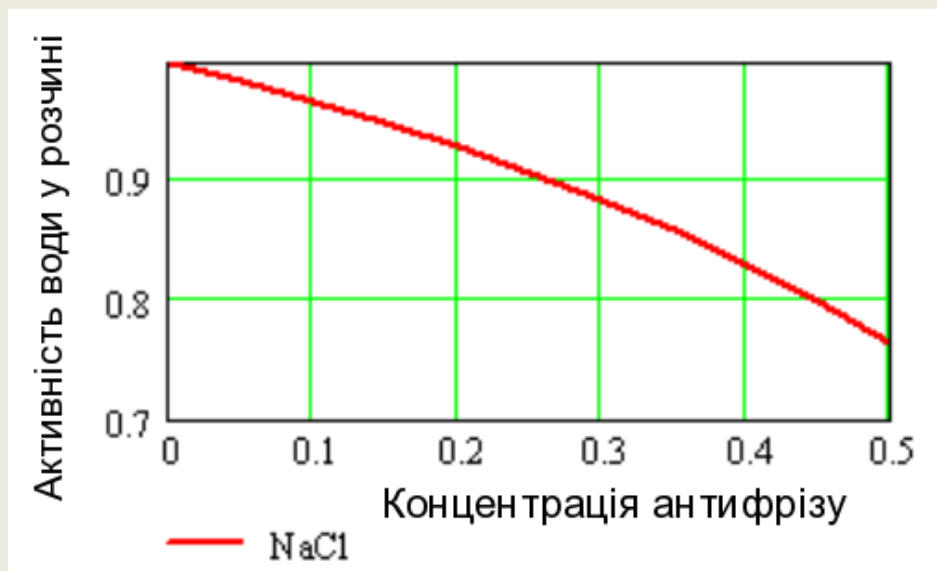


Рис. 1.5. Залежність активності води від концентрації депресанту

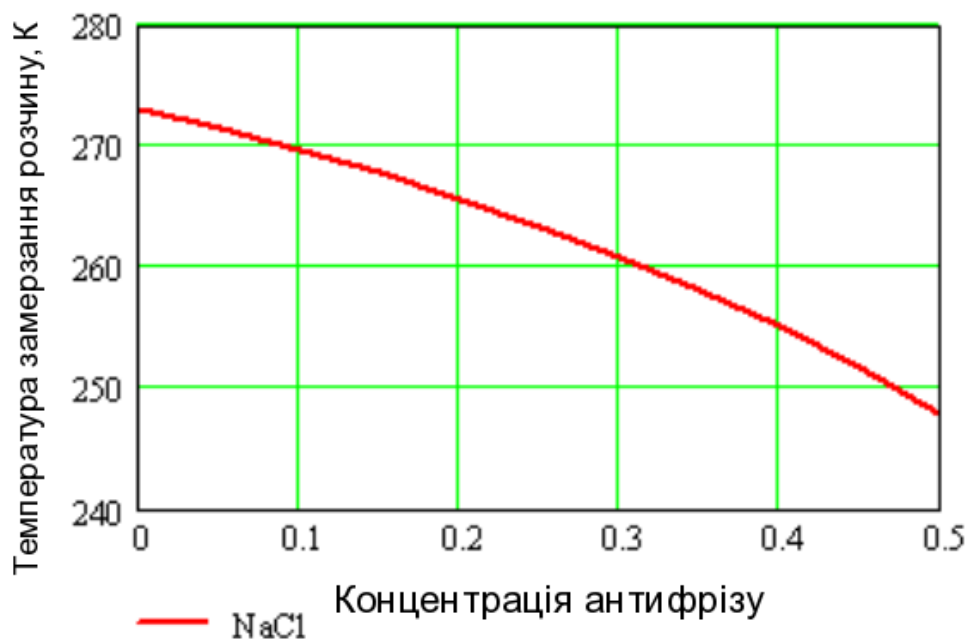


Рис. 1.6. Залежність зміни температури замерзання від концентрації депресанту

1.5. Масова концентрація льоду

Масова концентрація льоду w_i визначається кількістю холоду, який виділяє айс-сларі, і обчислюється через температуру замерзання розчину, яка є функцією концентрації розчину:

$$T = T_f(w_{fpd}). \quad (1.8)$$

Якщо початкова концентрація ($w_{fpd,0}$) і температура відомі, то масова концентрація льоду визначається як

$$w_i = 1 - \frac{w_{fpd,0}}{w_{fpd}(T)} \quad (1.9)$$

де $w_{fpd}(T)$ знаходиться з виразу (1.8). Для низьких концентрацій оцінку можна зробити за рівнянням (1.7).

Приклад 2:

Визначити масову концентрація льоду для розчину NaCl, якщо початкова концентрація депресанту була 7 % при температурі замерзання $-4,4^\circ\text{C}$ і температуру розчину знизили до $-7,5^\circ\text{C}$.

Розв'язання

Інтерполяція значень, наведених в довіднику Богданова [17], показує, що при зниженні температури розчину NaCl до $-7,5^{\circ}\text{C}$ концентрація депресанту зростає до 11 %. Тоді концентрація льоду буде дорівнювати:

$$w_i = 1 - \frac{0,07}{0,11} = 1 - 0,63 = 0,37.$$

Отже, якщо знизити температуру розчину NaCl так, що його концентрація в рідкій фазі підвищиться до 11 %, айс-сларі міститиме 37 % льоду.

Схематично це завдання наведено на рис. 1.7. Знижуючи температуру розчину з початковою концентрацією депресанту з точки *A* до точки *B*, ми підвищуємо концентрацію солі в розчині, що визначається точкою *C*.



Рис. 1.7. Схематичне визначення кількості льоду в розчині

Питання до розділу 1

1. Дати визначення рідкого льоду (айс-сларі) та пояснити його особливості.
2. Яку роль виконують депресанти у рідкому льоду?
3. Особливості використання органічних депресантів.
4. Особливості використання неорганічних депресантів.
5. Як визначити концентрацію розчину для робочого інтервалу температур?

6. Які характеристики треба знати для визначення температури замерзання рідкого льоду?

7. Як визначається масова концентрація льоду у рідкому льоді?

2. ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І ПРОЦЕСИ

Процеси тепло- і масопереносу айс-сларі у вторинних системах охолодження залежать від його властивостей, таких як теплопровідність, густина, динамічна в'язкість і ентальпія [1, 6]. Ці властивості залежать від концентрації айс-сларі, типу депресії точки замерзання й домішок, що використовуються для зниження точки замерзання. Для низьких концентрацій антифризу, коли точка замерзання віддалена від евтектичної точки, передбачається, що робочим тілом є вода.

2.1. Густина

Густина айс-сларі визначається через густину чистого льоду і густину рідкого розчину:

$$\rho_{is} = \frac{1}{w_i / \rho_i + (1 - w_i) / \rho_l} \quad (2.1)$$

Густина чистого льоду визначається як

$$\rho_i = \rho_0 + c \cdot T \quad (2.2)$$

де при $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\rho_0=917$, $c=1,73 \cdot 10^{-4}$.

На рис. 2.1 показано, як змінюється густина айс-сларі з додаванням різних депресантів залежно від концентрації льоду.

Приклад

Розрахувати густину айс-сларі з депресантом CaCl_2 , якщо льоду в розчині міститься 10% при $T=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Розв'язання

$\rho_l=1080\text{ кг/м}^3$ – густина розчину CaCl_2 .

$$\rho_{is} = \frac{1}{0,1/917 + (1 - 0,1)/1080} = 1061 \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

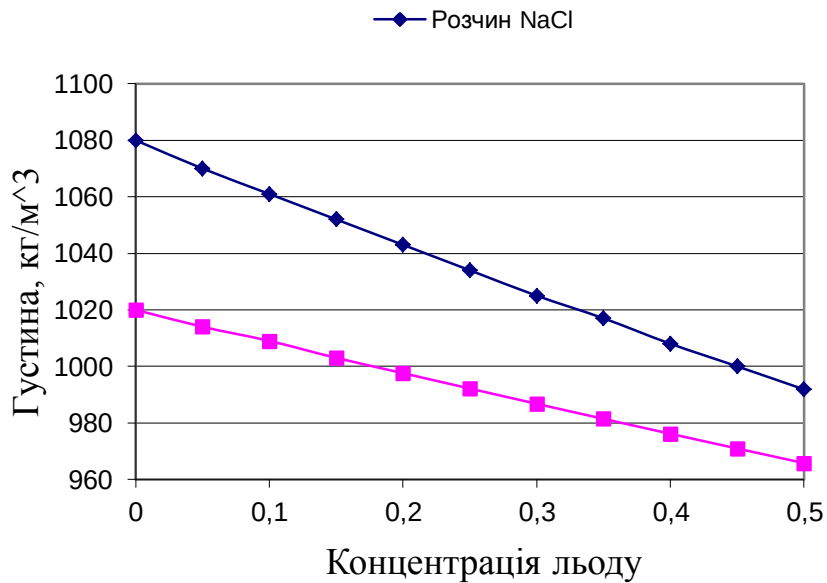


Рис. 2.1. Залежність густини від концентрації льоду

2.2. Ентальпія і теплоємність

Теплоємність айс-сларі визначається диференціюванням ентальпії відносно температури [1, 7]:

$$c_{p_app} = \left(\frac{\partial h_{is}}{\partial T} \right) \quad (2.3)$$

яка визначається як

$$h_{is} = w_i(T) \cdot (h_i(T) - \Delta H_f) + (1 - w_i(T)) \cdot h_l(T) \quad (2.4)$$

де

$$h_i(T) = -332,4 + T(2,12 + 0,008 \cdot T) \quad (2.5)$$

Тоді теплоємність айс-сларі можна розрахувати за формулою

$$c_{p_app} = \left(\frac{\partial w_i}{\partial T} \right) \cdot (h_i - \Delta H_f - h_l) + w_i \cdot \left(\frac{\partial h_i}{\partial T} \right) + (1 - w_i) \cdot \left(\frac{\partial h_l}{\partial T} \right) \quad (2.6)$$

Або, використовуючи теплоємність чистого льоду і рідкого розчину, можна отримати

$$c_{p_app} = \left(\frac{\partial w_i}{\partial T} \right) \cdot (h_i - \Delta H_f - h_l) + w_i \cdot c_{p_i} + (1 - w_i) \cdot c_{p_l} \quad (2.7)$$

Теплоємність крижаного рідкого розчину - це зведена теплоємність (c_{p_app}), тому що вона описує тепловий ефект зміни фази – перший доданок рівняння (2.7). При малих температурних інтервалах можна використовувати оцінку

$$\left(\frac{\partial w_i}{\partial T} \right) \approx \left(\frac{\Delta w_i}{\Delta T} \right) \quad (2.8)$$

Приклад розрахунку ентальпії і теплоємності наведено в додатку А.

2.3. Теплопровідність

Більшість моделей теплопровідності включає провідність рідкого розчину, провідність льоду й ефект взаємодії. Модель, що використовується для айс-сларі, базована на теорії Максвела і припускає що тверда фаза складається з сферичних частинок.

Бен Лахдар (1998) показав, що модель, запропонована Tareef (1940) дає задовільні результати для розчину етанолу щодо об'ємної концентрації айс-сларі 0,4 [4, 6, 7]:

$$\lambda_{is} = \lambda_{cf} \frac{\lambda_i + 2\lambda_{cf} - 2\phi_i(\lambda_{cf} - \lambda_i)}{\lambda_i + 2\lambda_{cf} + \phi_i(\lambda_{cf} - \lambda_i)} \quad (2.9)$$

Відповідно до рівняння (2.9), із збільшенням концентрації льоду, теплопровідність водольодової суміші збільшується (рис. 2.2).

Приклад 3:

Визначити теплопровідність айс-сларі з депресантом етилгліколем, якщо концентрація льоду в розчині 15 %, а теплопровідність етилгліколю складає 0,535 Вт/(мК) при температурі -5 °С.

Рзв'язання

$$\lambda_{is} = \lambda_{cf} \frac{\lambda_i + 2\lambda_{cf} - 2\phi_i(\lambda_{cf} - \lambda_i)}{\lambda_i + 2\lambda_{cf} + \phi_i(\lambda_{cf} - \lambda_i)} = 0,535 \cdot \frac{2,2 + 2 \cdot 0,535 - 2 \cdot 0,15 \cdot (0,535 - 2,2)}{2,2 + 2 \cdot 0,535 + 0,15 \cdot (0,535 - 2,2)} = 0,668 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

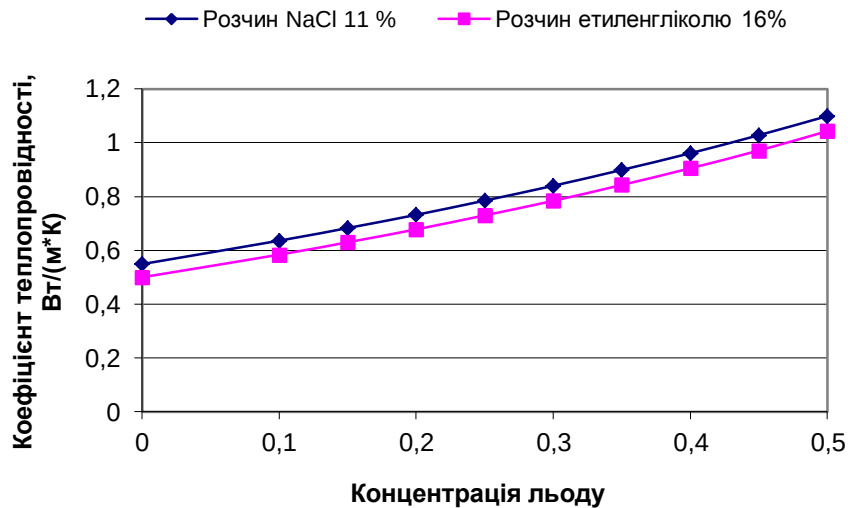


Рис. 2.2 Залежність теплопровідності від концентрації льоду

2.4. В'язкість

Динамічна в'язкість айс-сларі оцінюється через в'язкість рідкого розчину та об'ємної концентрації льоду. Для потоку ньютонівської рідини дотичні напруги залежать від кута зсуву γ :

$$\tau = \mu \cdot \frac{dV_z}{dr} = \mu \cdot \gamma. \quad (2.10)$$

Для обчислень динамічної в'язкості айс-сларі у багатьох теоретичних моделях використовується модель Ейнштейна

$$\mu_{is} = \mu_l \cdot (1 + 2,5 \cdot \phi_i) \quad (2.11)$$

Однією з найточніших моделей, яка базується на моделі Ейнштейна, є модель Томаса

$$\mu_{is} = \mu_l \cdot (1 + 2,5 \cdot \phi_i + 10,05 \cdot \phi_i^2 + 0,00273 \cdot e^{(16,6 \cdot \phi_i)}) \quad (2.12)$$

Ця емпірична модель побудована на багатьох даних різних досліджень. Експериментальна перевірка Кофельдом (Kauffeld) та ін. (1999) для випадку айс-сларі з етанолом показала, що формула дає похибки при концентраціях льоду вище 0,20. Передбачалося, що при більш високих концентраціях льоду флюїдизована рідина не відповідає ньютонівській рідині, але межа переходу до неньютонівської рідини розмита.

Окрім цього рівняння (2.12) не переходить у формулу (2.11) при концентрації льоду, що дорівнює нулю. Отже, використовується інше рівняння, а саме

$$\mu_{is} = \mu_l \cdot \left(1 + 2,5 \cdot \phi_i + 10,05 \cdot \phi_i^2 + 0,00273 \cdot \left(e^{(16,6 \cdot \phi_i)} - 1\right)\right) \quad (2.13)$$

Результат розрахунків в'язкості для айс-сларі від концентрації льоду наведено на рис. 2.3.

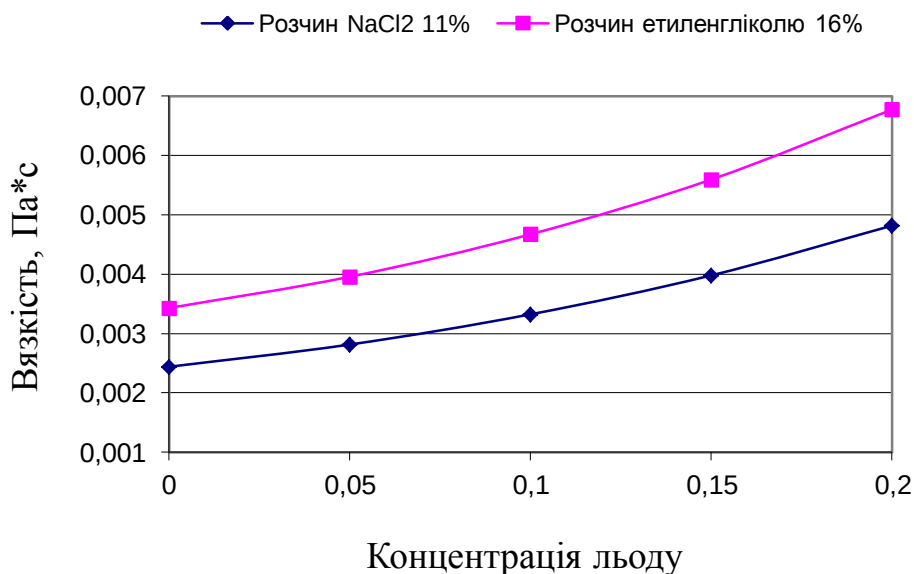


Рис. 2.3. Залежність в'язкості від концентрації льоду

Для концентрації льоду вище 0,20 запропоновано два типи реології псевдо-еластичність і рідина Бінгхама [1, 6].

Псевдо-еластична рідина описується рівнянням

$$\tau = K \cdot \gamma^n \quad (2.14)$$

де n - індекс закону потужності і K - густина. Для ньютонівської рідини $n=1$, $K= \mu$, і рівняння (2.14) збігається з рівнянням (2.13). Якщо $n < 1$, поведінка потоку - псевдо-еластична. Індекс $n < 1$ для концентрацій льоду до 0,28. В'язкість рідини залежить від кута зсуву:

$$\mu_{app} = \frac{\tau}{\gamma} = K \cdot \gamma^{(n-1)} \quad (2.15)$$

Для випадку рідини Бінгхама рівняння Ньютона модифіковано з урахуванням напруги зсуву:

$$\tau = \mu \cdot \gamma + \tau_0 . \quad (2.16)$$

Якщо напруга зсуву нижча від критичної ($\tau < \tau_0$), кут зсуву дорівнює нулю ($\gamma=0$). Для моделі Бінгхама в'язкість теж залежить від кута зсуву:

$$\mu_{app} = \frac{\tau}{\gamma} = \mu + \frac{\tau_0}{\gamma} . \quad (2.17)$$

Експериментальні результати різних досліджень мають значний розкид, а отже, висновок щодо типу реології для айс-сларі вище 20 % не може бути зроблений. Згідно з Frei та Egolf [8], відмінності викликані динамічними властивостями айс-сларі. Під впливом зсуву, наприклад в резервуарах зберігання, форма і розмір крижаних частинок можуть змінюватися і, як наслідок, змінюється реологічна поведінка флюїдизованого льоду, в той час як густина та ентальпія залишаються незмінними.

Розмір і тип устаткування, наприклад насосів, і час перебування в резервуарах зберігання і трубах значно залежать від властивостей айс-сларі. В кожному дослідженні ці параметри відмінні, а отже, реограми теж відрізняються. Frei та Egolf запропонували модифікацію моделі Бінгхама, яка включає подібні ефекти до параметра s [8].

$$\tau = \mu \cdot \gamma + (1 - e^{-s \cdot \gamma}) \cdot \tau_0 . \quad (2.18)$$

На рис. 2.4. наведено відносні зміни коефіцієнта теплопровідності, в'язкості, густини і теплоємності айс-сларі щодо водного розчину кухонної солі [6].

Через високу в'язкість айс-сларі найчастіше спостерігається ламінарна течія рідини. Для ламінарної течії рідини Бінгхама в циліндричній трубі профіль швидкості містить прямокутне ядро і два параболічних крила.

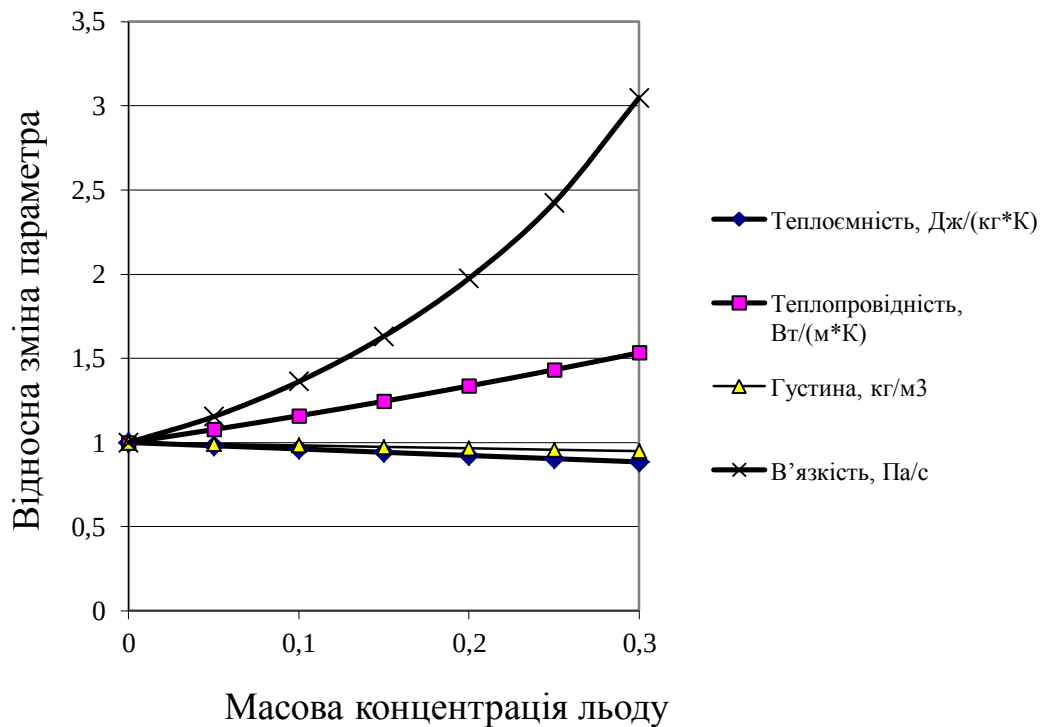


Рис. 2.4. Відносні властивості айс-сларі водного розчину NaCl при -6 °C

При зменшенні концентрації льоду ширина ядра зменшується і створює відомий параболічний профіль Хагена-Пуазейля для ламінарного ньютонівського потоку.

Приклад 3

Визначити в'язкість айс-сларі з додаванням депресанту CaCl_2 , якщо в розчині міститься 10 % льоду.

Розв'язання

Використовуючи залежність (2.13), отримаємо:

$$\mu_{is} = 2,55 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 2.5 \cdot 0.1 + 10.05 \cdot 0.1^2 + 0.00273 \cdot (e^{(16.6 \cdot 0.1)} - 1)) = 3,473 \cdot 10^{-3} (\text{Па} \cdot \text{с}).$$

2.5. Коефіцієнти тепловіддачі при ламінарній течії

Розглянемо ламінарну течію айс-сларі в горизонтально розташованій трубі. Для ізотермічної стінки труби середнє число Нуссельта визначається як [6]

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} = 1,75 \cdot Gz^{1/3}, \quad (2.19)$$

для числа Гретца $Gz > 100$ - як

$$Gz = Re \cdot Pr \cdot \frac{\pi D}{4L}. \quad (2.20)$$

Емпірична залежність для коефіцієнта теплопередачі за умови ламінарного потоку в циліндричних трубах має вигляд:

$$Nu = 38,3 \cdot Gz^{0.15} \cdot w_i^{0.52}, \quad (2.21)$$

де $3 < Re < 2000$ і $0,04 < w_i < 0,35$.

На рис. 2.5 наведено залежності числа Нуссельта від числа Рейнольдса для айс-сларі при концентраціях льоду 10 і 20 % і холодоносія $CaCl_2$. З графіків видно, що число Нуссельта для водокрижаної суміші буде вищим, ніж для $CaCl_2$, приблизно в 5-6 разів, і з підвищенням концентрації льоду його значення для айс-сларі зростає.

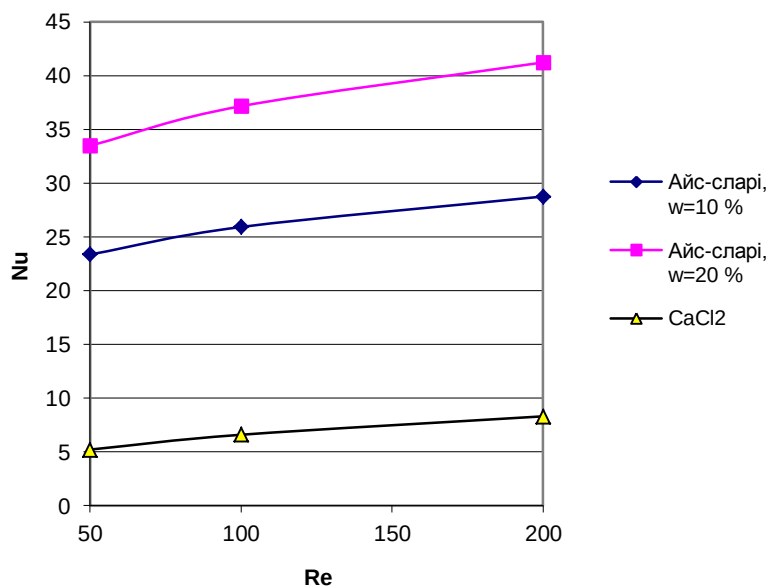


Рис. 2.5 Залежність числа Нуссельта від числа Рейнольдса для ламінарного плин у айс-сларі

Приклад

Визначити число Нуссельта для айс-сларі, якщо діаметр труби 20 мм,

довжина 1 м, швидкість плин у рідині в трубі 0,1 м/с, а як депресант використовується розчин CaCl_2 з масовою концентрацією льоду 25 %.

Розв'язання

Визначимо число Гретца, щоб дізнатися, яку саме із залежностей використовувати для обчислення числа Нуссельта.

Теплофізичні властивості водного розчину CaCl_2 при температурі -10°C : $C_p = 3,3 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\lambda = 0,534 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\mu = 4,06 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\rho = 1130 \text{ кг}/\text{м}^3$

Для визначення теплофізичних властивостей айс-сларі використовуємо наведені вище залежності. Тоді отримуємо

$$\text{число Рейнольдса: } Re = \frac{\omega \cdot D}{\nu_{is}} = \frac{0,1 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{9,2 \cdot 10^{-6}} = 217,9;$$

$$\text{число Прандтля: } Pr = \frac{\mu_{is} \cdot C_{pis}}{\lambda_{is}} = \frac{9,8 \cdot 10^{-3} \cdot 3,04 \cdot 10^3}{0,768} = 38,8;$$

$$\text{число Гретца: } Gz = 217,9 \cdot 38,8 \cdot \frac{3,14 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 1} = 132,8$$

Оскільки число Гретца більше 100, то використовується залежність 2.19:

$$Nu = 1,75 \cdot Gz^{1/3} = 1,75 \cdot 132,8^{1/3} = 8,9.$$

2.6. Коефіцієнти тепловіддачі при турбулентній течії

Для турбулентного потоку ньютонівської рідини відомі декілька емпіричних рівнянь, які подібні до рівняння (2.19) з урахуванням температурного чинника:

$$Nu = 0,027 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{wall}} \right)^{0,14} \quad (2.22)$$

Для неньютонівських рідин може бути використана залежність (Chabira і Richardson, 1999)

$$St = \frac{\alpha}{\rho \cdot v \cdot c_p} = 0,0152 \cdot Re^{-0,155} \cdot Pr^{-2/3} \quad (2.23)$$

де v – швидкість плин у айс-сларі, м/с.

Порівнюючи залежність числа Нуссельта від числа Рейнольдса при турбулентній течії для айс-сларі і холодоносія CaCl_2 (рис. 2.6), бачимо, що число Нуссельта для флюїдизованого льоду буде більшим в 3-6 разів залежно від концентрації льоду.

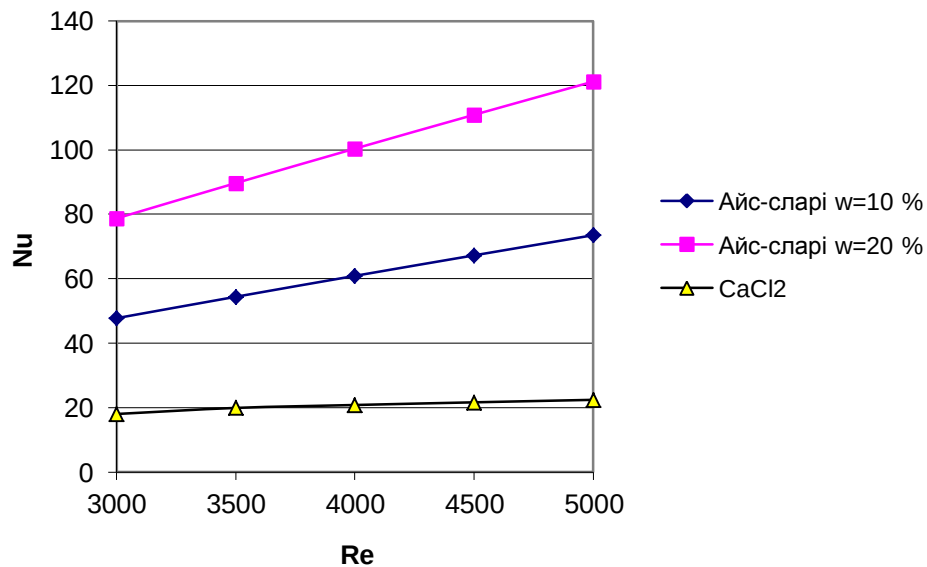


Рис. 2.6. Залежність числа Нуссельта від числа Рейнольдса для турбулентного плину рідини

Приклад

Визначити коефіцієнт тепловіддачі для турбулентного плину айс-сларі, використовуючи початкові дані з прикладу 1, якщо швидкість плину розчину 2 м/с.

Розв'язання

Коефіцієнт тепловіддачі визначається за залежністю (2.23):

$$\alpha = \rho \cdot \nu \cdot c_p \cdot 0,0152 \cdot \text{Re}^{-0,155} \cdot \text{Pr}^{-2/3} = 1068 \cdot 2 \cdot 3,04 \cdot 10^3 \cdot 0,0152 \cdot 4360^{-0,155} \cdot 38,8^{-2/3} = 1861 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

2.7. Перекачування айс-сларі

Втрати тиску під час плину айс-сларі в трубах визначаються з урахуванням залежності [6]

$$\Delta p = 2 f \cdot \rho v^2 \cdot L / D, \quad (2.24)$$

де f - фактор тертя, який для ламінарної течії становить

$$f = \frac{16}{\text{Re}} \quad (2.25)$$

Для турбулентного потоку фактор тертя визначається згідно з рівнянням Блазіуса:

$$f = \frac{c}{\text{Re}^{0,25}}, \quad (2.26)$$

де $c = 0,08$ - емпірична змінна.

Фактор тертя для турбулентного режиму плину айс-сларі буде нижчим, завдяки наявності кристалів, і залежитиме від розміру і концентрації крижаних кристалів.

Наступне рівняння зв'язує втрати тиску і пропускну спроможність циліндричних труб для ламінарної течії і воно є справедливим для всіх типів рідин реологій:

$$\varphi_v = -\frac{\pi r^3}{\tau_{\text{wall}}} \int_0^{\tau_{\text{wall}}} \tau^2 \bar{\gamma} d\tau, \quad (2.27)$$

де φ_v – об'ємний потік, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Для потоку ньютонівської рідини рівняння (2.24) набуває вигляду

$$\varphi_v = -\frac{\pi r^4}{8\mu} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta z} \quad (2.28)$$

і відоме як рівняння Хагена-Пуазейля.

Ефективність насоса визначається властивостями айс-сларі. Ротаційні насоси, наприклад, значно ефективніші для рідин з високою в'язкістю.

Приклад

Для умов попереднього прикладу розрахувати втрати тиску в трубі під час плин у айс-сларі.

Розв'язання

Визначимо фактор тертя за залежністю (2.26), оскільки плин рідини буде турбулентним:

$$f = \frac{0,08}{4360^{0.25}} = 9,8 \cdot 10^{-3}$$

Втрати тиску в трубі становлять:

$$\Delta p = 2 \cdot f \cdot \rho \cdot v^2 \cdot L / D = 2 \cdot 9,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1068 \cdot 2^2 \cdot \frac{1}{20 \cdot 10^{-3}} = 2,1 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

Питання до розділу 2

1. Від чого залежить густина айс-сларі?
2. Що треба враховувати при розрахунку теплоємності айс-сларі?
3. На якому припущенні базується залежність для розрахунку теплопровідності?
4. Як залежить теплопровідність від концентрації льоду?
5. Які моделі використовуються для визначення в'язкості рідкого льоду?
6. Який режим плин рідкого льоду найбільш поширений?
7. Порівняйте коефіцієнт тепловіддачі рідкого льоду та розчину солі у воді. Поясніть різницю.
8. Як розрахувати витрати енергії на перекачування рідкого льоду?

3. ЗРОСТАННЯ І АДГЕЗІЯ КРИСТАЛІВ ЛЬОДУ

3.1. Кристалізація льоду

Осідання льоду на стінках визначається утворенням центрів кристалізації льоду, зростанням кристалів і транспортуванням кристалів льоду з основної маси до стінок. Для утворення центрів кристалізації та їх подальшого зростання необхідна рушійна сила. Водний розчин повинен бути перенасичений водою, яка охолоджується нижче, ніж початкова точка замерзання у флюїдизованому шарі генератора айс-сларі [6, 9, 10].

Початкове утворення центрів кристалізації ядер ймовірно відбувається по-різному у флюїдизованих шарах, оскільки стінки і тверді частинки забезпечують більшу зовнішню площу поверхні. Однак у багатьох експериментах додатково підсаджували кристали льоду, щоб починалося повторне утворення центрів кристалізації. Без підсаджування кристалів флюїдизований шар може швидко застигнути після початкового утворення центрів кристалізації. Після першого утворення центрів кристалізації ядер, свіжі ядра формуються в основному вторинним процесом утворення ядер, завдяки контактам кристал-кристал, кристал-частинка і кристал-стінка. Новосформовані кристали льоду перебувають у фазі зростання, яка складається з трьох стадій:

- 1) транспортування молекул з основної маси розчину до межового шару навколо ядра;
- 2) об'єднання молекул як поверхні кристала;
- 3) теплопередача звільненої прихованої теплоти.

У разі кристалізації льоду з розчину, транспорт молекул води до кристалів льоду може також бути розглянутий як транспорт розчину далеко від кристала. Goede and Rosmalen (1990) запропонували залежність для визначення швидкості зростання кристалів для масопереносу:

$$G_d = \frac{k_d}{w_{int}} \cdot (w_{int} - w_b) \cdot \frac{\rho_l}{\rho_i}, \quad (3.1)$$

де сила руху - це різниця між концентрацією поверхні розділення кристала льоду (w_{int}) і масовою концентрацією (w_b) депресанту. Постійна швидкість для масопереносу (k_d) знижується при підвищенні концентрації депресанту на межі. Швидкість зростання поверхні інтеграції оцінюється за допомогою різниці температур між межею (interface) (T_{int}) і кристалом в стані рівноваги (T_{int}^*):

$$G_{surf} = k_{surf} \cdot (T_{int}^* - T_{int})^n. \quad (3.2)$$

В даному випадку для кінетичної інтеграції поверхні льоду визначено і використано рівняння (3.2): $k_{surf} = 2,7 \cdot 10^{-3}$ м/с і $n = 1,55$.

Прихована теплота переміщується до стінки теплообмінника за допомогою провідності через кристали льоду, при цьому передбачається, що опір теплопередачі до стінки значно нижчий, ніж опір теплопередачі до основної маси флюїдизованного шару:

$$G_{heat} = \frac{\lambda_i \cdot (T_{int} - T_w)}{\delta \cdot \rho_i \cdot \Delta H_f}. \quad (3.3)$$

Повну лінійну швидкість збільшення кристала у стінки отримують шляхом об'єднання рівнянь (3.1), (3.2) та (3.3):

$$G_{tot} = k_{surf} \cdot (T_b^* - T_b - G_{tot} \cdot (\frac{w_b}{k_d} \cdot \frac{\rho_i}{\rho_l} \cdot \frac{dT_b^*}{dw_b} + \frac{\delta \cdot \rho_i \cdot \Delta H_f}{\lambda_i}))^n. \quad (3.4)$$

де dT_b^*/dw_b - похідна від рівноважної температури замерзання, яка має відношення до концентрації депресанту.

3.2. Адгезія льоду

Для видалення кристалів льоду з поверхні необхідна сила, що за величиною більша, ніж сила адгезії. Сила адгезії визначається з зовнішніх енергій, γ_{ij} , що включають три фази.

На рис. 3.1 наведено кристал льоду, який прилипнув до твердої стінки. Робота адгезії для цього кристала через одиничну площу порівнюється з подібним кристалом в розчині (Forster та ін., 1999):

$$W_A = \gamma_{13} + \gamma_{23} - \gamma_{12}, \quad (3.5)$$

де індекс 1 означає кристал льоду, 2 - тверду поверхню і 3 - розчин. Зовнішня напруга зв'язана кутом зіткнення (θ) прикріпленого кристала до твердої поверхні.

Зовнішня енергія між двома матеріалами може бути визначена за їх зовнішньою напругою. Зовнішня напруга - це сума по-різному змішаних різних молекулярних взаємодіючих сил, котрі, як передбачається, залежатимуть від властивостей матеріалу. Fowkes (1963) запропонував підхід, в якому поверхнева напруга ділиться на дисперсійну (γ^d) і недисперсійну компоненти (γ^{nd}). Був запропонований альтернативний метод van Oss (1993), за яким зовнішня напруга була розділена на полярні взаємодії Лівшица - Ван-дер-Ваальса (γ^{LW}) і полярні кислотно-базові взаємодії (γ^{AB}). Компонента γ^{LW} складається з дисперсійних молекулярних взаємодій γ^d і додатково включає диполь-диполь взаємодії і диполь-вимушений диполь взаємодії (Freitas and Sharma, 2001). Якщо ці взаємодії не відбуваються γ^d дорівнює γ^{LW} , як у випадку для полярних речовин. Для багатьох інших речовин ці взаємодії відносно малі в порівнянні з дисперсійними силами (Schneider та ін., 1997), таким чином, дані γ^{LW} можуть бути використані, щоб оцінити γ^d [8].

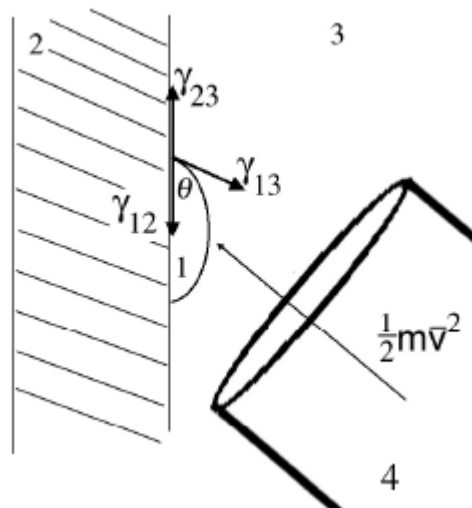


Рис. 3.1. Адгезія кристала льоду на стінці і наближення частки флюїдизованного шару:

- 1 - кристал льоду; 2 - сталева стінка теплообмінника; 3 - розчин айс-сларі;
- 4 - сталеві частки (not to scale with ice crystal)

Yamada та ін., (2002) досліджували дію адгезії льоду до міді в розчині етиленгліколю, використовуючи метод Fowkes, і припустили, що зовнішня напруга домінує над дисперсійними компонентами поверхневої напруги:

$$\gamma_{ij} = \gamma_i + \gamma_j - 2 \cdot \sqrt{\gamma_i^d \cdot \gamma_j^d} \quad (3.6)$$

де індекси i та j - речовини рівняння (3.5).

Для взаємодії льоду з розчином етиленгліколю, можливо, неприпустимо нехтувати полярною компонентою зовнішньої напруги. Дані для полярних компонент поверхневих енергій є в літературі, проте вони недоступні для вивчення всіх речовин, а отже, рівняння (3.6) все ще використовується для оцінювання дії адгезії.

У табл. 3.1 наведено дані поверхневої напруги і дисперсійні компоненти, що використовуються при обчисленні роботи адгезії. Якщо значення γ^d не доступні, використовуються значення γ^{LW} .

Таблиця 3.1 - Поверхнева напруга і дані дисперсійних компонент, що використовуються для оцінювання дії адгезії льоду на нержавіючу сталь в різних розчинах

Дисперсійні компоненти	Концентрація, %	T, °C	γ , мДж/м ²	γ^d , мДж/м ²
Лід	-	0	62,4	29,6
Вода	-	0	75,8	22,8
	-	20	72,8	21,8
Стальні частинки	-	20	53	41,9
Розчин етиленгліколю	6,3	-2	73,7	23,5
	11,8	-4	72	24,1
Розчин NaCl	3,4	-2	77,1	24
	66	-4	78,3	25,2

Дисперсійні компоненти розчинів були оцінені за їх чистими речовинами в рівнянні (3.7). За цим рівнянням також була оцінена залежність температури дисперсійних компонент; припускали, що вона подібна до варіації поверхневої напруги розчину з температурою:

$$\gamma_{sol}^d = (\gamma_{wat}^d \cdot (1 - w_{fpd}) + \gamma_{fpd}^d \cdot w_{fpd}) \cdot \frac{\gamma_{sol-20^0}}{\gamma_{sol-Tf}}. \quad (3.7)$$

Додаткові зовнішні впливи на роботу адгезії, що не входять до рівняння (3.6), можуть бути електростатичними силами і броунівським рухом. Крім того, шорсткість нержавіючої сталі, геометрія поверхні, домішки і дефекти в структурі кристала льоду можуть також впливати на роботу адгезії. Дія адгезії, обчислена за допомогою рівняння (3.5), є індикатором для сили адгезії, але тут залучений не тільки вплив. Необхідно також розглядати силу, яка здатна до зчеплення кристалів льоду. Під час видалення льоду на практиці сили, які достатньо великі, можуть впливати на лід, щоб також бути причиною розриву зчеплення в кристалах льоду.

Приклад

Визначити дію адгезії кристалів у 3.4% розчині NaCl.

Розв'язання

Для визначення величини дії адгезії необхідно спочатку порахувати зовнішню напругу за формулою (3.6). Дані, що необхідні для розрахунку, внесені в табл. 3.1.

$$\gamma_{13} = \gamma_1 + \gamma_3 - 2 \cdot \sqrt{\gamma_1^d \cdot \gamma_3^d} = 62,4 + 77,1 - 2 \cdot \sqrt{29,6 \cdot 24} = 86,2 \text{ (мДж/м}^2\text{)};$$

$$\gamma_{23} = \gamma_2 + \gamma_3 - 2 \cdot \sqrt{\gamma_{21}^d \cdot \gamma_3^d} = 53 + 77,1 - 2 \cdot \sqrt{41,9 \cdot 24} = 66,7 \text{ (мДж/м}^2\text{)};$$

$$\gamma_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - 2 \cdot \sqrt{\gamma_1^d \cdot \gamma_2^d} = 62,4 + 53 - 2 \cdot \sqrt{29,6 \cdot 41,9} = 45 \text{ (мДж/м}^2\text{)};$$

Дія адгезії:

$$W_A = \gamma_{13} + \gamma_{23} - \gamma_{12} = 86,2 + 66,7 - 45 = 107,9 \text{ (мДж/м}^2\text{)}.$$

3.3. Удари частинок

Лід, що прилипає до стінок теплообмінника, можна видалити, якщо сума сил, що діють на лід, більша за сили адгезії, або більша, ніж сила зчеплення льоду для достатнього періоду часу. Сили, які можуть видалити кристали льоду від стінок, головним чином впливають ударами твердих частинок

флюїдизованного шару; інші сили, менш важливі, є причиною зсуву рідини і плавучості кристалів льоду [8]. Тверді частинки за формою сферичні або циліндричні і виготовлені з нержавіючої сталі.

Частота ударів частинки і сила їх впливу на стінки або на адгезію кристалів льоду до стінок визначають швидкість видалення кристалів льоду зі стінок флюїдизованного шару. Наступні співвідношення були розроблені для випадків перпендикулярних ударів сферичних частинок на тверді стінки. Вірність їх щодо флюїдизованих шарів була підтверджена експериментально. Максимальна сила удару залежить від швидкості частинок в перпендикулярному напрямку u_x :

$$F_{\max} = 0,76 \cdot \left(\frac{E}{1 - \nu^2} \right)^{0,4} \cdot d_p^2 \cdot \rho_p^{0,6} \cdot u_x^{1,2}, \quad (3.8)$$

де ν - коефіцієнт Пуассона і E - комбінований модуль еластичності, визначається як

$$E = \frac{E_1 \cdot E_2}{(E_1 + E_2)}. \quad (3.9)$$

Індекси 1 та 2 означають матеріали, що беруть участь в зіткненні, тобто, лід і неіржавіючу сталь. Середню частоту зіткнень сферичних частинок із стінкою труби розраховують за формулою

$$\overline{f} = \frac{6 \cdot \overline{u_x} \cdot (1 - \varepsilon)}{4 \cdot \pi \cdot d_p^3}. \quad (3.10)$$

Середню перпендикулярну швидкість твердих частинок в стаціонарному флюїдизованому шарі з порізненістю 0,8 за формулою

$$\overline{u_x} = 0,10 \cdot u_s \quad (3.11)$$

3.4. Зростання кристалів

Після виробництва айс-сларі речовина надходить до резервуара для подальшого зберігання, де відбувається зростання кристалів льоду за рахунок таких механізмів, як тертя, агломерація і оствальдське дозрівання [11, 12, 13]:

1) В резервуарах з механічним перемішуванням, кристали можуть пошкоджуватися через зіткнення з твердими тілами, такими, як стінки

резервуара, або іншими кристалами. Всі ці види механізмів пошкодження названі тертям. Можуть бути розглянуті два види тертя: пошкодження та абразивне стирання. У разі пошкодження енергія зіткнення відносно висока, і зіткнення розділяє вихідний кристал на цілий ряд фрагментів з широким спектром розмірів. Коли енергія зіткнень не є достатньо високою, щоб розламати кристал на безліч шматочків, може статися так, що тільки незначна частина кристала буде роздроблена. Таке явище названо абразивним стиранням. Фрагменти, вироблені стиранням, у більшості випадків значно менші, ніж кристали-батьки. Окрім виробництва малих фрагментів, абразивне стирання закруглює великі кристали.

У літературі немає доступної інформації щодо впливу ефектів тертя на айс-сларі, але експериментально вивчена поведінка тертя кристалів хлориду натрію в ацетоні. У цих експериментах розмір початкових кристалів коливається в межах від 100 до 500 мкм, тоді як фрагменти, вироблені абразивним стиранням, коливаються від 5 до 50 мкм після 12 годин (рис. 3.2) [11, 13].

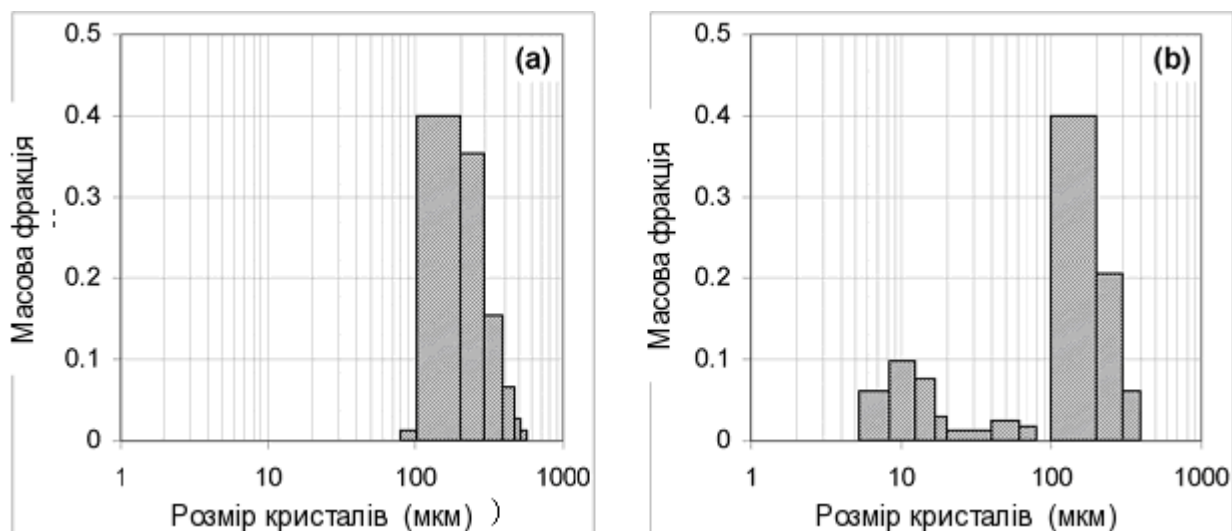


Рис. 3.2. Розподіл розмірів кристалів перед (а) і після (б) 12 годин експерименту тертя [11, 13]

2) Коли два кристали стикаються в насиченій суспензії, може статися так, що вони прилипають один до одного і стають єдиним кристалом. Цей механізм називають агломерацією. У випадку сильної агломерації середній діаметр кристалів може значно зростати, тоді як повне число кристалів зменшується.

Отже, кристали льоду виявляють сильну тенденцію до скупчення і ось чому важливо вивчити феномен агломерації.

Ширай та інші (1987) провели експерименти, щоб спостерігати агломерацію кристалів льоду в водних розчинах лактози. Айс-сларі був отриманий в резервуарі з перемішуванням, який призвів до отримання кристалів льоду з діаметрами від 100 до 500 мкм. Після виробництва кристали льоду зберігалися протягом двох годин в іншому резервуарі з перемішуванням. Результати спостережень після зберігання показали, що агломерація відбувається в деяких випадках виробництва кристалів льоду з діаметрами, що коливаються в межах від 1 до 3 мм. Агломерація не спостерігалася, коли початкові кристали льоду були малими [11, 14].

3) Айс-сларі в резервуарі для зберігання складається спочатку з кристалів різних розмірів, як великих, так і маленьких. Через зовнішнє вкладення енергії ці різні за розмірами кристали не мають однакової рівноважної концентрації або рівноважної температури. Через ці відмінності менші кристали будуть розчинятися, тоді як великі кристали будуть зростати. В результаті середній розмір кристала збільшується, тоді як фракція льоду залишається постійною. Описане явище назване оствальдським дозріванням.

Рівноважна концентрація c_{eq} кристалів діаметром D може обчислюватися з рівноважної концентрації для нескінченної кількості кристалів c_{eq} наступним співвідношенням, відомим як рівняння Кельвіна (Kelvin):

$$\ln\left(\frac{c_{eq}}{c_{eq,\infty}}\right) = \frac{2 \cdot B_a \cdot V_m \cdot \gamma}{3 \cdot B_v \cdot R \cdot T \cdot D}, \quad (3.12)$$

де D – діаметр кристала льоду, м;

B_a – фактор форми поверхні, співвідношення площі поверхні кристала до D^2 ;

B_v – фактор форми об'єму, співвідношення об'єму кристала до D^3 ;

V_m – молярний об'єм кристалів льоду, $1,97 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$;

γ – поверхневий натяг, Н/м.

Сміт та інші (1985) вивчали дозрівання кристалів льоду в водних розчинах в багатьох деталях. У своїх експериментах вони виробляли айс-сларі різних концентрацій з водних розчинів сахарози. Після виробництва айс-сларі із середнім діаметром кристалів 100 мкм був поміщений до ізолюваного резервуара з однорідним перемішуванням. Експерименти показали, що середній розмір кристала зростає у всіх випадках, але зростання було значно більшим для низьких концентрацій сахарози (рис. 3.2 і рис. 3.3). Повільний процес дозрівання при вищих концентраціях сахарози був пояснений нижчою швидкістю передачі маси зростання кристала і його розчиненням в цих концентраціях.

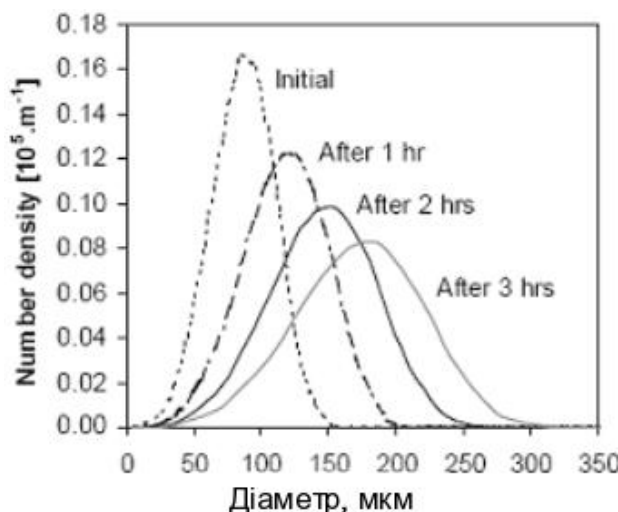


Рис. 3.3. Зростання розподілу розмірів кристалів протягом дозрівання

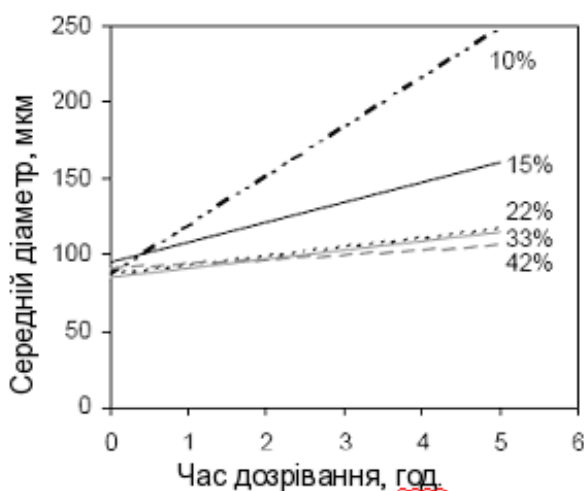


Рис. 3.4. Дозрівання при різних концентраціях сахарози [15]

Експериментально підтверджено, що високі концентрації депресанту точки замерзання уповільнюють процес дозрівання [11, 13].

Питання до розділу 3

1. З яких стадій складається фаза зростання кристала?
2. Від чого залежить швидкість зростання кристала?
3. Від чого залежить робота сил адгезії?
4. Порівняйте дисперсійну складову адгезії та складову Ліфшиц - Ван-дер-Ваальса взаємодії.
5. Що впливає на зміни розмірів кристалів льоду при зберіганні?
6. Як впливає тертя на розміри кристалів?
7. Що таке агломерація?
8. Що таке оствальдське дозрівання?

4. ГЕНЕРАТОР С ФЛЮЇДИЗОВАНИМ ШАРОМ

4.1. Конструкція генератору

На початку дев'яностих років XX ст. Klaren і Van der Meer (1991) запропонували використовувати генератор з флюїдизованим шаром для виробництва айс-сларі. До цього часу теплообмінники використовувалися для опріснення води [16].

Схема генератора з флюїдизованим шаром (кожухотрубного теплообмінника) наведена на рис. 4.1. Він складається з вертикальних труб, розташованих в трубній дощці. Первинний охолоджувач випаровується в міжтрубному просторі. Флюїдизований шар розташований в трубах і складається з твердих частинок, які флюїдизовані подаванням висхідного плавного потоку айс-сларі. Тверді частинки видаляють кристали льоду, які формуються на внутрішній поверхні труби, і транспортують їх до головного потоку. Тверді частинки розділяються на виході теплообмінника і опускаються вниз через низхідну трубу.

Теплообмінник, зображений на рис. 4.1, має внутрішню низхідну трубу. У деяких випадках може використовуватися зовнішня низхідна труба. Це може стати в нагоді, коли важко відокремити частки від головного потоку.

Основний робочий принцип роботи флюїдизованого шару показаний на рис. 4.2. Айс-сларі подає потік флюїдизованих сталевих частинок, що видаляють лід, сформований на стінках теплообмінника, до основного потоку айс-сларі. При цьому сталеві частки збільшують теплопередачу, руйнуючи ламінарний межовий шар, який створює значний тепловий опір.

Принцип роботи генератора з флюїдизованим шаром нагадує принцип роботи теплообмінника з поверхнею, що зчищається. Частинки, наприклад, скла або заліза, можуть розглядатися як велика кількість маленьких місцевих скребків.

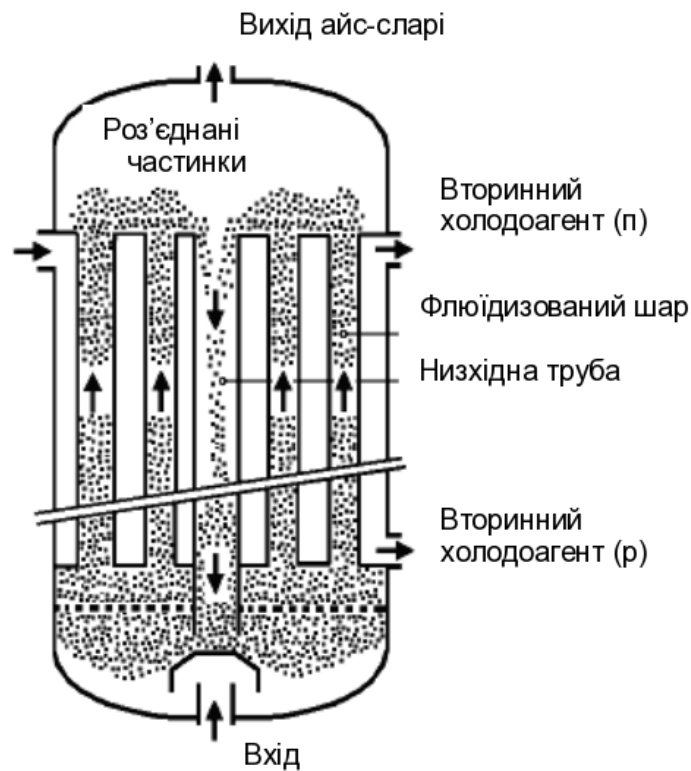


Рис. 4.1. Генератор з флюїдизованим шаром

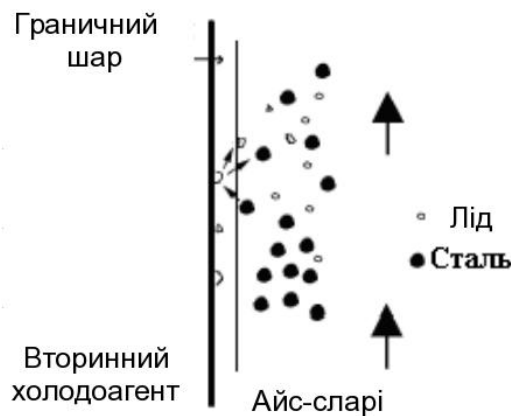


Рис. 4.2. Принцип роботи флюїдизованого шару

Навіть в разі великої кількості довгих труб теплообмінник може обслуговуватися одним простим насосом. При цьому флюїдизований шар майже не бере участі в теплообміні. Відносно великі швидкості рідини можуть бути отримані в трубах без проблем. Частинки з великими швидкостями стикаються зі стінками і руйнують тепловий межовий шар ефективніше, ніж це було б можливо з великою скребачкою, котра оберталася.

Тверді частинки відділяються від айс-сларі у верхній частині теплообмінника флюїдизованого шару. Флюїдизовані шари можуть працювати постійно, або з рециркуляцією твердих частинок через низхідну трубу. Схему системи з флюїдизованим шаром з охолоджувачем-випарником наведено на рис. 4.3.

4.2. Стаціонарна флюїдизація

Для флюїдизованих шарів, що однорідно збільшуються в об'ємі, швидкість встановлення маси частинок пов'язана з порізненістю шару і кінцевої швидкості (співвідношення Річардсона - Закі) [6]

$$u_s = u_{\infty wall} \cdot \varepsilon^n \quad (4.1)$$

де n - коефіцієнт Річардсон - Закі, $u_{\infty wall}$ - кінцева швидкість, виправлена щодо впливу перешкод стін:

$$u_{\infty wall} = u_{\infty} \cdot 10^{\left(\frac{dp}{D}\right)} \quad (4.2)$$

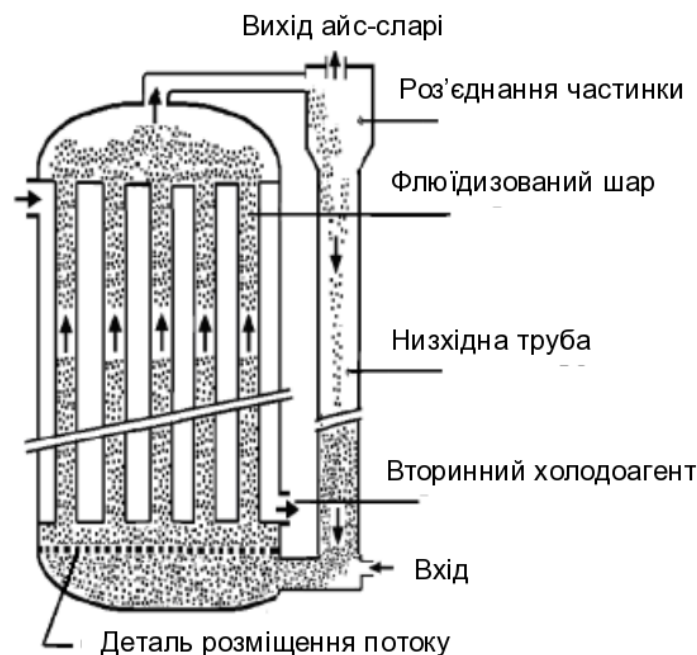


Рис. 4.3. Схема генератора айс-сларі з флюїдизованим шаром і зовнішнім опускним каналом

Кінцева швидкість і коефіцієнт n визначаються розміром і формою твердих частинок, а також властивостями рідини. Кінцева швидкість визначається з

рівноваги між силами лобового опору і плавучості для падаючих частинок у великій кількості рідини:

$$V_p \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_{is}) = C_{D\infty} \cdot A_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{is} \cdot u_{\infty}^2, \quad (4.3)$$

де $C_{D\infty}$ - коефіцієнт термінального лобового опору на частинку.

З визначенням термінального числа Рейнольдса:

$$Re_{\infty} = \frac{\rho_{is} \cdot u_{\infty} \cdot d_p}{\mu_{is}} \quad (4.4)$$

рівновагу сил рівняння (4.3) можна переписати для випадку сферичних частинок:

$$Re_{\infty}^2 \cdot C_{D\infty} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_{is} \cdot d_p^3 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_{is})}{\mu_{is}^2}. \quad (4.5)$$

Коефіцієнт лобового опору є функцією числа Рейнольдса. Якщо використовуються несферичні частинки, то рівняння (4.5) також можна використовувати. Діаметр сфери (d_p) необхідно замінити еквівалентним діаметром ($d_{p_{eq}}$), який визначається як діаметр сфери з таким самим об'ємом, як частка.

Для циліндричних частинок, ($d_{p_{eq}}$) маємо

$$d_{p_{eq}} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot d_{cyl}^2 \cdot h_{cyl}} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot d_{cyl}^3}. \quad (4.6)$$

Якщо висота циліндра дорівнює діаметру циліндра (рівносторонній барабан), тоді рівняння (4.6) значно спрощується.

Використовуючи еквівалентний діаметр частинки можна також визначити сферичність частки (φ), яка є безрозмірним фактором форми, що визначає подібність частинки до сфери:

$$\varphi = \frac{\pi \cdot d_{p_{eq}}^2}{\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot d_{cyl}^2 + \pi \cdot d_{cyl} \cdot h_{cyl}} = \frac{d_{p_{eq}}^2}{\frac{3}{2} \cdot d_{cyl}^2}. \quad (4.7)$$

Для рівносторонніх циліндрів сферичність приблизно дорівнює 0,87.

Коефіцієнт n рівняння (4.1), коефіцієнт Річардсона - Закі, є необхідним, щоб передбачити порізнєність шару і поверхневу швидкість. Коефіцієнт залежить від числа Рейнольдса:

$$\begin{array}{ll} n=4,65 & \text{Re}_\infty \leq 0,2 \\ n=4,4 \cdot \text{Re}_\infty^{-0,03} & 0,2 < \text{Re}_\infty \leq 1 \\ n=4,4 \cdot \text{Re}_\infty^{-0,1} & 1 < \text{Re}_\infty \leq 500 \\ n=2,39 & 500 < \text{Re}_\infty \end{array} \quad (4.8)$$

Ці співвідношення були вперше отримані Річардсоном і Закі, які також спостерігали слабкий вплив щодо співвідношення діаметра частинок і діаметра шару на коефіцієнт n [6].

Декілька альтернативних співвідношень були подані для обчислення n ; наприклад, одним з них є співвідношення Rowe (1987):

$$n = \frac{2,35 \cdot (2 + 0,175 \cdot \text{Re}_\infty^{0,75})}{1 + 0,175 \cdot \text{Re}_\infty^{0,75}} \quad (4.9)$$

Це співвідношення було розроблене, щоб передбачити поведінку флюїдизованих шарів зі сферичними частинками. Подібний підхід придатний для обчислення станів флюїдизації несферичних частинок.

4.2.1. Оптимальна порізнєність шару

Використовуючи коефіцієнти Річардсона - Заки, можна визначити оптимальну порізнєність шару. З цією метою оцінено похідну для рівняння [6]:

$$\text{Nu}_h = c_1 \cdot \text{Re}_h^{c_2} \cdot \text{Pr}^{c_3} \quad (4.10)$$

де $c_1 = 0,0612$, $c_2 = 0,724$ і $c_3 = 0,625$.

$$\text{Nu}_p \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} = c_1 \cdot \left(\frac{\text{Re}_p}{1 - \varepsilon} \right)^{c_2} \cdot \text{Pr}^{c_3} = c_1 \cdot \left(\frac{K_1 \cdot \varepsilon^n}{1 - \varepsilon} \right)^{c_2} \cdot \text{Pr}^{c_3} \quad (4.11)$$

де K_1 включає параметри числа Рейнольдса, яке не залежить від порізнєності шару. Перепишемо рівняння (4.11):

$$\text{Nu}_p = c_1 \cdot K_1^{c_2} \cdot \text{Pr}^{c_3} \cdot \varepsilon^{nc_2-1} \cdot (1-\varepsilon)^{1-c_2} = K_2 \cdot \varepsilon^{nc_2-1} \cdot (1-\varepsilon)^{1-c_2} \quad (4.12)$$

Визначимо похідну:

$$\frac{d\text{Nu}_p}{d\varepsilon} = K_2 \cdot \left((n \cdot c_2 - 1) \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} - (1-c_2) \right) \cdot \varepsilon^{nc_2-1} \cdot (1-\varepsilon)^{1-c_2} \quad (4.13)$$

Дорівнюючи рівняння (4.13) до 0, отримаємо оптимальну порізненість шару

$$\varepsilon_{opt} = \frac{n \cdot c_2 - 1}{c_2 \cdot (n - 1)} \quad (4.14)$$

З моделлю теплопередачі при $c_2 = 0,723$ і коефіцієнтом Річардсона - Закі – (2.57), оптимальна порізненість шару передбачена рівнянням (4.14), дорівнює 0,76. Для сферичних частинок $n=2,39$ і моделі Хейда $c_2 = 0,75$ оптимум також дорівнює 0,76.

Подібна оцінка зроблена для частоти зіткнень:

$$\varepsilon_{opt} = \frac{n}{n+1}, \quad (4.15)$$

яка дає мінімальну частоту зіткнень при порізненості шару 0,72 для циліндричних частинок. Для сферичних частинок оптимум знайдений при $\varepsilon = 0,71$. Максимальна сила зіткнення і кінетична енергія частинок не мають оптимальної порізненості шару: чим вища порізненість шару, тим вищі ці два параметри. Це можна пояснити тим, що оптимальна порізненість шару для теплопередачі вища за порізненість шару максимальної частоти зіткнень.

4.2.2. Коефіцієнти тепловіддачі

Щоб визначити коефіцієнти тепловіддачі для флюїдизованого шару, існує декілька залежностей, які були отримані експериментальним шляхом [9]. Експеримент проводився у стаціонарній флюїдизації, при цьому змінювався діаметр частинок флюїдизованого шару.

У результаті експерименту була отримана залежність для коефіцієнтів тепловіддачі:

$$\text{Nu}_h = 0.0612 \cdot \text{Re}_h^{0.724} \cdot \text{Pr}^{0.625}; \quad (4.16)$$

$$\text{Nu}_h = \frac{\alpha \cdot d_p}{\lambda} \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}; \quad (4.17)$$

Re_h – гідравлічне число Рейнольдса, яке обчислюється за наступною залежністю:

$$\text{Re}_h = \frac{\rho \cdot u_s \cdot d_p}{\mu} \cdot \frac{1}{1 - \varepsilon}, \quad (4.18)$$

де u_s – поверхнева швидкість рідини, яка обчислюється за фактичною швидкістю, $\text{м}^2/\text{с}$; v – фактична швидкість рідини, $\text{м}^2/\text{с}$;

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}, \quad (4.19)$$

де C_p – теплоємність, $\text{Дж}/\text{кгК}$;

Ця залежність може бути застосована для обчислення коефіцієнта тепловіддачі в стаціонарному флюїдизованому шарі.

Також були визначені залежності для знаходження коефіцієнтів теплообміну, засновані на моделі Гнілінськи (Gnielinski) для турбулентних потоків ($\text{Re} > 2300$) в гладких трубах:

$$\text{Nu}_{d_{in,iner}} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (\text{Re}_{d_{in,iner}} - 1000) \cdot \text{Pr}}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot (\text{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1)} \cdot \left(1 + \left(\frac{d_{in,iner}}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right) \quad (4.20)$$

де f – фактор тертя:

$$f = (1,82 \cdot \log(\text{Re}_{d_{in,iner}}) - 1,64)^{-2} \quad (4.21)$$

$\text{Re}_{d_{in,iner}}$ – число Рейнольдса всередині труби;

$d_{in,iner}$ – діаметр внутрішньої труби, м ;

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі в міжтрубному просторі запропонована така залежність:

$$\text{Nu}_{d_{hyd}} = 0,0273 \cdot (\text{Re}_{d_{hyd}} - 1000)^{0,762} \cdot \text{Pr}^{0,33}, \quad (4.22)$$

Також розроблено узагальнену модель для визначення коефіцієнтів тепловіддачі для флюїдизованого шару, засновану на моделях Джаміалахмаді (Jamialahmadi):

$$\begin{aligned} \text{Nu}_p = & 0,1493 \cdot \text{Re}_p^{0,72} \cdot \text{Pr}^{0,52} \cdot (1 - \varepsilon)^{0,19} \cdot \varepsilon^{-1,41} \times \\ & \times \left(\frac{d_p}{D_h}\right)^{0,17} \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}\right)^{0,03}, \end{aligned} \quad (4.23)$$

де ρ_s – густина частинки, кг/м³;

$$\text{Re}_p = \frac{\rho \cdot u_s \cdot d_p}{\mu}. \quad (4.24)$$

Хейд (Haid) спростив модель (4.23) до моделі з трьома константами:

$$\text{Nu}_h = 0,0734 \cdot \text{Re}_h^{0,75} \cdot \text{Pr}^{0,63}. \quad (4.25)$$

Існує модель Кім (Kim), що задовольняє сильнов'язкій рідині:

$$\text{Nu}_p = 0,0722 \cdot \text{Re}_p^{0,25} \cdot \text{Pr}^{0,5} \cdot \text{Ar}^{0,25} \cdot \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}\right)^{0,25}. \quad (4.26)$$

4.3. Циркулюючий флюїдизований шар

У виробництві застосовується в основному генератор з циркулюючим флюїдизованим шаром (див. рис. 4.3) [6, 16, 17]. Тверді частинки не залишаються у флюїдизованому шарі, а циркулюють вздовж труби. Після сепарації від основного потоку тверді частинки подаються знизу у флюїдизований шар. Циркулюючий флюїдизований шар має ряд переваг, завдяки яким він ширше застосовується у виробництві, ніж система зі стаціонарною флюїдизацією. У системі з циркулюючим флюїдизованим шаром порізненість шару є незалежною змінною, яка не має певної поверхневої

швидкості рідини. Таким чином, поверхнева швидкість може бути вибрана і встановлена значно вищою в циркулюючій моделі. Коефіцієнти теплообміну вищі, ніж при стаціонарному шарі. Розмір теплообмінника може бути меншим і грошові витрати теж менші. Контролювати кількість частинок у флюїдизованому шарі і контролювати висоту шару також легше, ніж в стаціонарній моделі. Інша перевага циркулюючого шару – це те, що частинки можуть бути видалені з системи без зупинки теплообмінника.

До недоліків флюїдизованого циркулюючого шарувідноситься те, що необхідно мати більшу кількість устаткування. Також сила нагнітання повинна бути вища, щоб забезпечити циркуляцію частинок.

4.3.1. Флюїдизований шар в циркулюючій моделі

У циркулюючій моделі частинки рухаються через флюїдизований шар і мають висхідну швидкість. Ця швидкість може бути визначена за швидкістю циркулюючих частинок [16]:

$$v_p = \frac{m_p}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_p \cdot A} \quad (4.27)$$

Порізненість циркулюючого шару обчислюється з падіння тиску на метр висоти шару:

$$\frac{\Delta p}{h} = \rho_l \cdot g + (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_p - \rho_l) \cdot g + F_l + F_p. \quad (4.28)$$

У рівнянні (4.28) передбачається, що тертя об стінку є сумою тертя рідини і твердих частинок [6]. Сила тертя рідини визначається за рівнянням для фактора тертя рідини:

$$f_1 = \frac{0,0791}{\text{Re}^{0,25}} \quad (4.29)$$

Сила тертя

$$F_1 = \frac{2 \cdot f_1 \cdot \varepsilon \cdot \rho_l \cdot v_l^2}{D} \quad (4.30)$$

Фактор тертя частинок визначений експериментально:

$$f_p = \frac{7,33 \cdot 10^{-3}}{v_p^2}, \quad (4.31)$$

і сила тертя приводить в дію частинки:

$$F_p = \frac{2 \cdot f_p \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_p \cdot v_p^2}{D}. \quad (4.32)$$

Після заміни рівняння (4.31) рівнянням (4.32) видно, що сила тертя частинок не залежить від швидкості частинок згідно з цією моделлю.

Внесок тертя частинок об стінку і рідину відносно малий в порівнянні з нерухомою різницею тиску частинок і рідини, особливо якщо тверді частинки мають високу густину. Таким чином, останні два члени рівняння (4.28) можуть бути проігноровані. Наприклад, у флюїдизованому шарі з айс-сларі, що містить 0,05 NaCl, і крижаною фракцією 0,10, тертя об стінку складає 1.9 % від повного падіння тиску для стаціонарного випадку. Це обчислено при порізненості шару 0,8 циліндричних частинок діаметром 4 мм і густиною 7800 кг/м³ в шарі діаметром 0,055 м.

З рівняння (4.33) видно, що термінальна швидкість ковзання частинок зростає для великих і стислих частинок за турбулентних умов з подібними формами частинок:

$$u_\infty = \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{d_p \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_l)}{\rho_l \cdot C_D} \right)^{0,5}. \quad (4.33)$$

Сила тертя рідини об стінку визначається за допомогою швидкості рідини:

$$F_l = 2 \cdot \left(\frac{0.0791}{\text{Re}^{0.25}} \right) \cdot \frac{\varepsilon \cdot \rho_l \cdot v_l^2}{D}. \quad (4.34)$$

До того ж, тертя частинок об стінку зростає через збільшення густини частинок:

$$F_p = 2 \cdot \left(\frac{7.33 \cdot 10^{-3}}{v_p^2} \right) \cdot \frac{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_p \cdot v_p^2}{D}. \quad (4.35)$$

Повне тертя стінки зростає для великих і густих частинок. Було виявлено, що для важчих частинок розвивається нерівний розподіл частинок.

Наприклад, маленькі скляні намиста, $\rho=2460 \text{ кг/м}^3$ і діаметром 0,4 мм, порівнюються з великими сталевими частинками, $\rho=7800 \text{ кг/м}^3$ і діаметром 4 мм. Передбачається, що швидкість частинок для обох випадків 0,1 м/с. Сила опору середовища на скляні намиста в 24 рази вища, ніж сили тертя об стіни для скляних намистин. Для сталевих частинок сили опору в 5,4 рази більша, ніж сили тертя. Тертя стінки відносно більш важливе для великих і стислих частинок.

4.3.2 Тепловіддача в циркулюючих флюїдизованих шарах

Коефіцієнти тепловіддачі не обов'язково збільшуються, якщо застосовуються циркулюючі сталеві частинки. Основні тенденції наведені на рис. 4.4 [6, 16]. Цей рисунок заснований на експериментальних коефіцієнтах теплопередачі в циркулюючих флюїдизованих шарах з частинками більше 1 мм.

Модель, яка дозволяє обчислити коефіцієнти теплообміну для систем з циркулюючим флюїдизованим шаром, була запропонована Ердманом (Erdmann). Вона заснована на експериментах з частинками 1,6 - 3 мм із сталі, скла, кераміки і свинцю. В'язкість рідини знаходилася в межах 0,47 - 100 мПа·с. Коефіцієнт тепловіддачі циркулюючого шару складається з двох частин: теплообмін потоку рідини без флюїдизованих частинок плюс внесок теплообміну флюїдизованих частинок. У моделі Ердмана внесок частинок циркулюючого шару знаходиться у зв'язку з внеском частинок в стаціонарний шар. Внесок експоненціально зменшується при збільшенні швидкостей рідин:

$$\alpha_{circ} = \alpha_{sp}(u_{circ}) + (\alpha_{stat}(u_{stat}) - \alpha_{sp}(u_{stat})) \times \exp\left(-0,0358 \cdot \left(\frac{u_{stat}}{u_{wall\infty}} - 1\right) \cdot Re_{p,\infty}^{0,185}\right). \quad (4.36)$$

Рівняння (4.36) передбачає коефіцієнти теплообміну для різних частинок з максимальною відносною похибкою нижче 20 % для в'язкості рідин 0,47 і 10 мПа·с. Відносні похибки для в'язкості рідин 100 мПа·с склали 28 %.

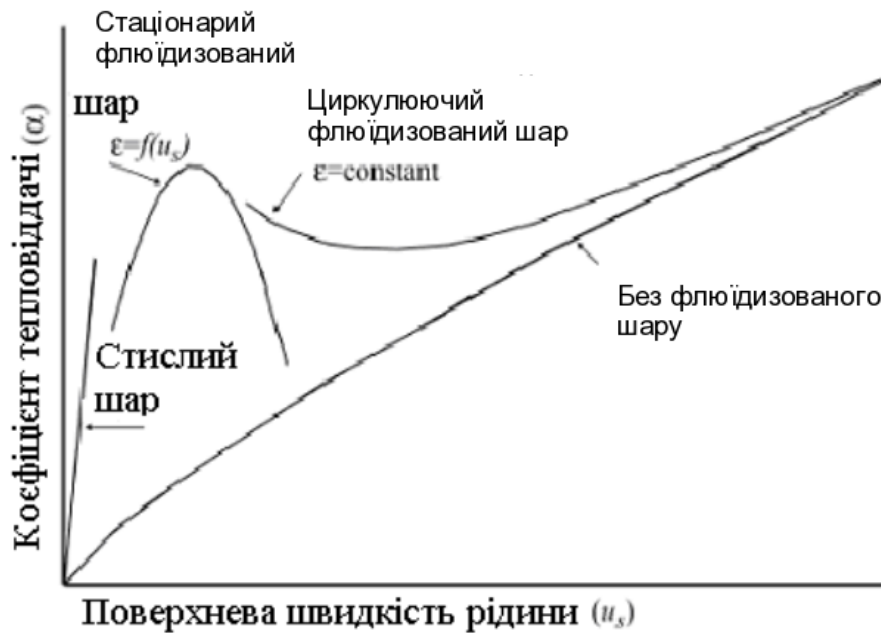


Рис. 4.4. Тенденції коефіцієнтів тепловіддачі при зростанні швидкості рідини для різних типів флюїдизації

Коефіцієнти теплообміну оцінені для умов турбулентного потоку:

$$Nu_{sp} = \frac{\alpha_{sp} \cdot D}{\lambda} = 0,027 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33}. \quad (4.37)$$

Продуктивність насоса зростає і тому сила входу насоса оцінюється як

$$P_{pump} = \frac{\Delta p \cdot \varphi_v}{\eta_{pump}}, \quad (4.38)$$

де η_{pump} - ефективність насоса, φ_v - об'ємна продуктивність.

4.4. Механізми теплопередачі в генераторі з флюїдизованим шаром

Швидкість теплопередачі від стінки до шару збільшується за допомогою сталевих частинок порівняно з теплопередачею в трубах без флюїдизованих шарів. Це викликано трьома механізмами [6, 11]:

1. Тверді частинки порушують ламінарний межовий шар, який чинить великий опір теплопередачі. Також очікувалося, що цей позитивний результат відбудеться в перебігу крижаної кристалізації.
2. Тверді частинки переносять тепло за допомогою провідності в перебігу безпосереднього зв'язку із стінками. Цей позитивний результат може бути зменшений через присутність кристалів льоду.
3. Теплопередавальні стінки містять явне засмічення. Удари твердих частинок запобігають утворенню постійного шару льоду на стінках теплообмінника.

У разі теплопередачі від стінки до шару в генераторі флюїдизованого шару айс-сларі невідомо, яким саме механізмом це здійснюється. Присутність кристалів льоду, ймовірно, заважає теплопередачі. Розглянуто три можливості:

1. Немає дії кристалів льоду. Швидкість теплопередачі буде такою ж, як і в звичайних рідко-твердих флюїдизованих шарах. Застосовують термофізичні властивості рідкого розчину шуги.
2. Крижані кристали заважають швидкостям теплопередачі, але не пристають до стінок теплообмінника. Айс-сларі може розглядатися як єдина рідина.
3. Є непостійний шар льоду на стінках теплообмінника. Крижані кристали переміщаються безперервно за допомогою механічних зіткнень твердих частинок флюїдизованого шару.

Поєднання цих варіантів також можливе. Наприклад, присутність кристалів льоду може змінити процес теплопередачі, поки існує напівпостійний крижаний шар, що пристав до стінок.

Додаткові чинники також можуть визначати швидкості теплопередачі. Крижані кристали можуть бути сформовані, головним чином, в ламінарному

межовому шарі біля стінок. Повільний масообмін в основній масі флюїдизованного шару може призвести до нерівномірного розподілу кристалів льоду. Більші локальні частинки льоду можуть вплинути на швидкості теплообміну.

4.5. Математична модель генератора з флюїдизованим шаром

Вхідними даними для проектування генератора айс-сларі є такі параметри: процентний вміст льоду в айс-сларі на вході і виході генератора, температурний рівень і кількість речовини, що витрачається. Виходячи з цього, методика проектування включає такі кроки:

1) Першим кроком в проектуванні генератора з флюїдизованим шаром є вибір розчину, що забезпечує необхідний температурний рівень. У табл. 4.1 наведено деякі види депресантів [18], при додаванні яких у воду, залежно від їх процентного вмісту, можна знизити температуру замерзання розчину до певної величини.

Таблиця 4.1 - Типи депресантів

Депресант	Процентний вміст (ξ), %	Температура замерзання розчину, (T_3), °C
Хлористий літій (LiCl)	7,8	-8,9
Хлористий літій (LiCl)	15,5	-21,2
Хлористий кальцій (CaCl)	9,4	-5,2
Хлористий кальцій (CaCl)	14,7	-10,2
Хлористий натрій (NaCl)	7	4,4
Хлористий натрій (NaCl)	16,2	-12,2
Етиленгліколь	8,4	-4
Етиленгліколь	16	-7

2) Необхідно визначити швидкість рідини, за якої частинки у флюїдизованому шарі ширятимуть. Ця швидкість дозволяє оцінити силу удару частинки, необхідну для видалення кристалів льоду з поверхні теплообмінника. Швидкість ширяння обчислюється залежно від числа Архімеда [19]:

$$Ar = \frac{g \cdot d_e^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_{tv} - \rho}{\rho} \quad (4.39)$$

Еквівалентний діаметр визначаємо за формулою

$$d_e = \sqrt[3]{6 \cdot \frac{V_q}{\pi}} \quad (4.40)$$

Величини густини і в'язкості середовища шукаємо у довіднику [18].

За формулою для киплячого шару [19] обчислюємо швидкість віднесення частинок залежно від числа Архімеда. Ця швидкість відповідає швидкості ширяння частинок:

$$Re = 1,74 \cdot \sqrt{Ar} . \quad (4.41)$$

Використовуючи отримані дані, можемо визначити величину імпульсу частинки:

$$p = m_i \cdot \nu . \quad (4.42)$$

Частоту пульсацій тиску [20] розраховуємо за формулою

$$f = \frac{\sqrt{g \cdot (2 - \varepsilon)}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{H \cdot \varepsilon}} . \quad (4.43)$$

Для визначення сили імпульсу частинки використовуємо таку формулу:

$$F = f \cdot p . \quad (4.44)$$

Силу імпульсу всіх частинок визначаємо як додатак імпульсу однієї частинки, помножений на кількість частинок і поділений на 3, оскільки вважаємо, що у нас частинка може рухатися досить імовірно за трьома напрямками:

$$F_v = F \cdot \frac{n}{3} . \quad (4.45)$$

3) Задаючи розмір частинок флюїдизованого шару, вибираємо діаметр труб, в яких шар циркулюватиме [21]. Після цього визначаємо витрату флюїдизованого шару за співвідношенням

$$G_{rp} = v_{rp} \cdot \rho_{rp} \cdot S_{vn} . \quad (4.46)$$

4) Задаючи процентний вміст льоду в айс-сларі на виході генератора, визначаємо його температуру виходу:

$$T_{vix} = \frac{1}{\frac{1}{273,15} - \frac{R \cdot \ln(a)}{M_v \cdot H}} . \quad (4.47)$$

Активність води розраховуємо за формулою

$$a = \frac{1}{1 + \frac{C_1 \cdot M_v}{(1-w) \cdot M}} \quad (4.48)$$

Кінцеву концентрацію солі у розчині – за формулою

$$C_1 = \frac{C_0}{1-w} \quad (4.49)$$

де w – концентрація льоду у розчині.

4) Визначаємо ентальпії входу і виходу айс-сларі:

$$i_{vx} = C_{rp} \cdot T_{vx} , \quad (4.50)$$

де i_{vx} – ентальпія входу айс-сларі, Дж/кг;

$$i_{vix} = w \cdot i_i \cdot (1-w) \cdot C_{rp} \cdot T_{vix} , \quad (4.51)$$

де i_{vix} – ентальпія виходу айс-сларі, Дж/кг;

i_i – ентальпія льоду, Дж/кг;

6) Розраховуємо холодопродуктивність генератора:

$$Q = G_{rp} \cdot (i_{vx} - i_{vix}) . \quad (4.52)$$

7) Визначаємо поверхневу швидкість рідини за дійсною:

$$u_s = v_{rp} \cdot \varepsilon . \quad (4.53)$$

8) Обчислюємо кількість труб в одному ході апарата [21]:

$$n_{tr} = \frac{4 \cdot G_{rp}}{v_{rp} \cdot \pi \cdot d_{vn}^2 \cdot \rho_{is}} , \quad (4.54)$$

де d_{vn} – внутрішній діаметр труб, м;

Потім уточнюємо набуте значення залежно від того, як розташовані труби: шестикутником або колом [20].

9) Визначаємо крок між трубами:

$$s = (1,3 \div 1,4) \cdot d_n, \quad (4.55)$$

де d_n – зовнішній діаметр труб, м;

10) Розраховуємо внутрішній діаметр кожуха:

$$D_{vn} = s \cdot m, \quad (4.56)$$

де m – число труб, розташованих по великій діагоналі, шт.

11) Визначаємо числа Рейнольдса і Прандтля для флюїдизованого шару. За отриманими даними визначаємо, який є режим течії і залежно від цього обчислюємо коефіцієнт тепловіддачі.

12) Якщо у міжтрубному просторі циркулює розсіл, то коефіцієнт тепловіддачі обчислюємо за такою залежністю [21]:

$$Nu = 0,154 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,33}. \quad (4.57)$$

13) Коефіцієнт тепловіддачі для флюїдизованого шару визначаємо з залежностей, наведених в підпункті 4.2.2.

14) Обчислюємо коефіцієнт теплопередачі:

$$k = \frac{1}{d_n \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{vn} \cdot d_{vn}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{st}} \cdot \ln\left(\frac{d_n}{d_{vn}}\right) + \frac{1}{\alpha_n \cdot d_n} \right)}, \quad (4.58)$$

де α_n – коефіцієнт тепловіддачі з боку охолодного розсолу, Вт/м²К;

α_{vn} – коефіцієнт тепловіддачі з боку флюїдизованого шару, Вт/м²К;

λ_{st} – коефіцієнт теплопровідності сталі, Вт/мК.

15) Внутрішню площу генератора визначаємо за даним співвідношенням:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta T_{\log}}. \quad (4.59)$$

16) Розраховуємо довжину труб теплообмінника:

$$l = \frac{F}{n_{tr} \cdot \pi \cdot d_n} \cdot \quad (4.60)$$

При виконанні розрахунку на виході можемо отримати труби дуже великої довжини або дуже маленької. Тоді необхідно повернутися до 3-го пункту, вибрати інший діаметр труб і зробити перерахунок всіх пунктів наново.

4.6. Аналіз методики проектування

На базі експериментальних даних [12] проведено аналіз методики проектування генератора з флюїдизованим шаром. Схематично генератор зображений на рис. 4.5.

Експеримент проводився із стаціонарним флюїдизованим шаром, який знаходився в сталевій циліндричній трубі заввишки 4,55 м з внутрішнім діаметром 56,3 мм, де знаходились сталеві неіржавіючі циліндричні частинки, діаметром 4 мм і висотою 4мм.

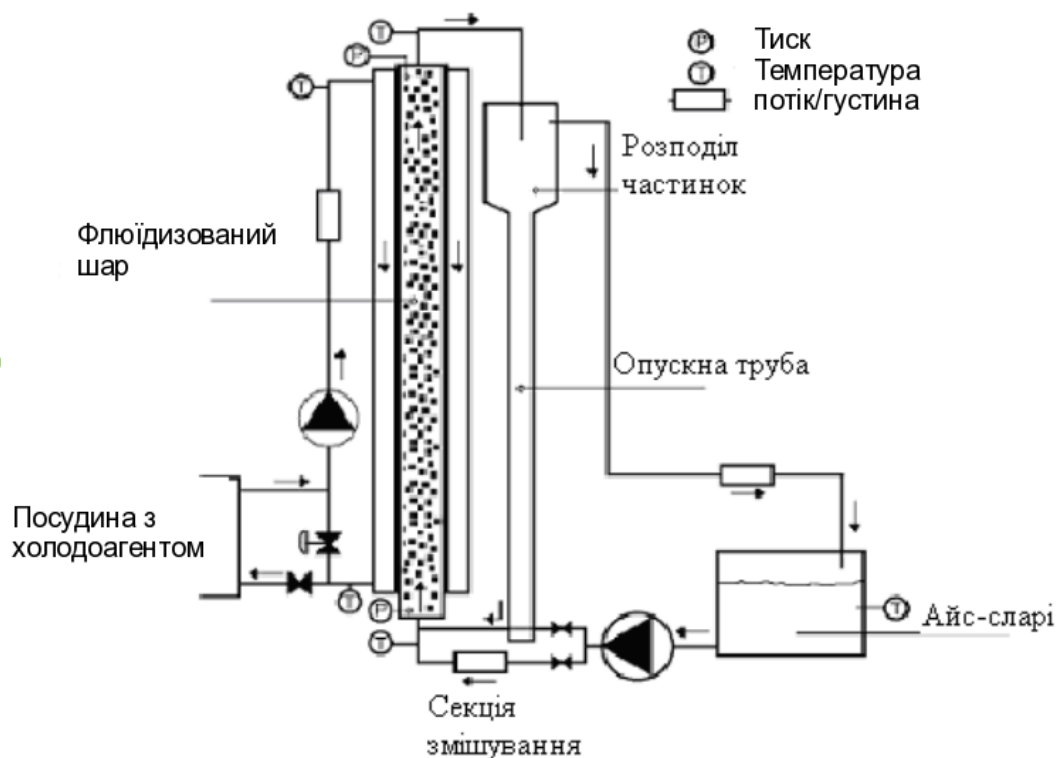


Рис. 4.5. Експериментальна установка з флюїдизованим шаром

У міжтрубному просторі циркулював 34-відсотковий розчин формиату калію, який використовувався як охолодне середовище, з продуктивністю

приблизно 5 кВ при -10°C . Під час експериментів для виробництва айс-сларі використовувався депресант етиленгліколь з концентраціями 6.8 %, 10.2 %, 11.8 %.

Дані експерименту та вхідні дані (табл. 4.2), були використані для розрахунків за описаною математичною моделлю та порівняні з експериментальними даними.

Таблиця 4.2 - Вхідні дані

Густина сталеві частинки, кг/м^3	ρ_{tv}	7900
Радіус циліндрової частинки, м	r	0,002
Висота циліндрової частинки, м	h	0,004
Внутрішній діаметр труби з киплячим шаром, м	d_{vn}	0,056
Зовнішній діаметр труби з киплячим шаром, м	d_n	0,059
Внутрішній діаметр зовнішньої труби з охолодним розсолон, м	D_{vn}	0,070
Вміст льоду в айс-сларі на виході генератора, %	w	5

У табл. 4.3 зіставлено результати розрахунку для трьох різних концентрацій етиленгліколю з експериментально отриманими даними. Як охолодний розсіл був вибраний 19 %-й розчин хлориду кальцію.

Таблиця 4.3 - Порівняння експериментальних даних з порахованими значеннями

ξ , %	ε	G , кг/с	$\dot{\alpha}$, Вт/м ² К	$\dot{\alpha}_{calc}$, Вт/м ² К	Q , кВт	Q_{calc} , Вт	F , м ²	F_{calc} , м ²	L , м	L_{calc} , м
6,8	0,78	0,36	3000	2700	5	5,1	0,8	0,8	4,55	4,5
10,2	0,77	0,44	2910	3008		6,2		0,82		4,8
11.8	0,74	0,82	2840	3100		11,7		1,3		7,1

Як видно з табл. 4.3, пораховані значення для генератора з флюїдизованим шаром (в першому рядку) і експериментально отримані дані корелюють між собою.

4.7. Інші типи генераторів айс-сларі

Тепер відома безліч методів та типів генераторів айс-сларі [6]. Комерційно доступними видами генераторів є апарати з очищенням льоду з поверхневого випарника та вакуумними системами (Zakeri, 1997). Але їх застосування обмежене. Поверхневий метод є придатним для того, щоб охолодити потужності 1 - 500 кВт, вакуумний метод - для того, щоб охолодити потужності 150 - 2000 кВт (Paul, 1997). Інші методи отримання айс-сларі засновані на переохолодженні рідини, або на прямому контакті з напиленням без стіни теплообміну (Fukusako та ін., 1999).

Більшість методів має один або кілька недоліків, які обмежують їх широке застосування. Поверхневі випарники з очищенням вимагають високих інвестицій і мають високі експлуатаційні витрати. Вакуумні системи ефективні у великомасштабному виробництві.

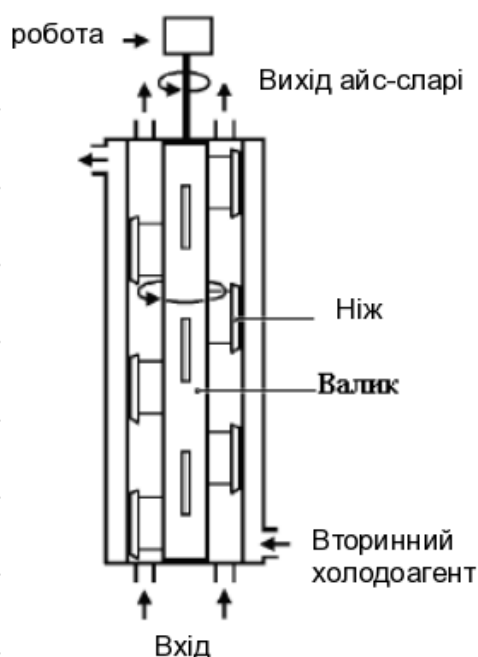


Рис. 4.6. Генератор айс-сларі з ножами

Генератор айс-сларі з ножами. Схема генератора айс-сларі з ножами наведена на рис. 4.6 та рис. 4.7. Первинний охолоджувач випаровується в кільцевому каналі між стінками двох концентричних труб. Айс-сларі утворюється у внутрішній трубі, де лід формується на поверхні внутрішньої труби і видаляється ножами, розташованими на роторі. Для збільшення

поверхні теплообміну і забезпечення високих коефіцієнтів теплообміну збільшують діаметр ротора. Висока поверхнева швидкість не завжди потрібна в таких системах. Збільшення крижаної фракції від вхідного отвору до виходу може тоді бути більш важливим, ніж високий коефіцієнт теплопередачі.

Для очищення поверхні теплообмінника можна використовувати стрижні, орбіти обертання яких збігаються з внутрішньою поверхнею труб. Стрижні простіші в обслуговуванні і забезпечують високі коефіцієнти теплопередачі (Gladis та ін., 1995).

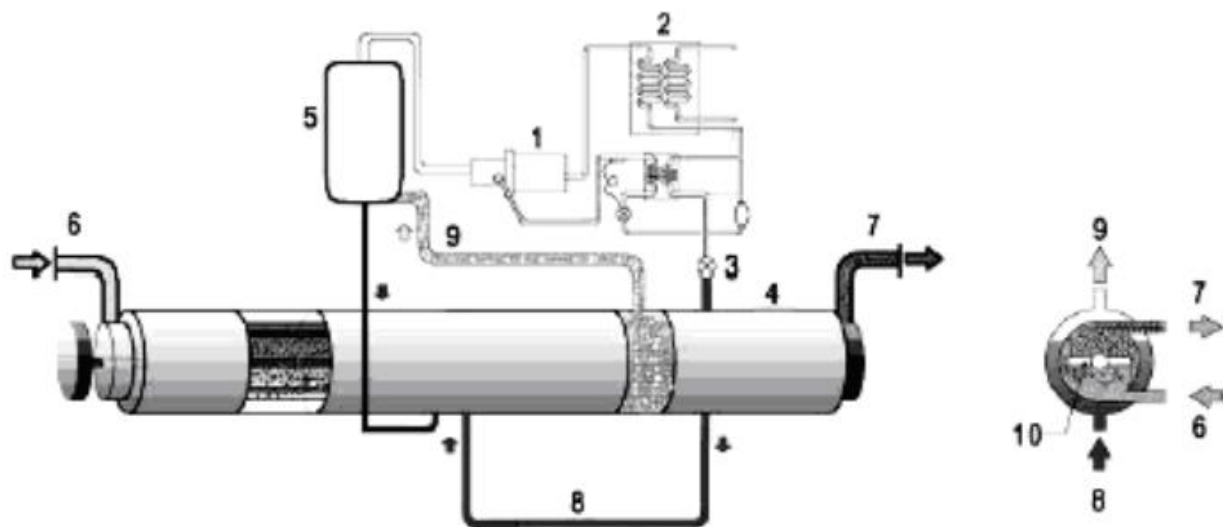


Рис. 4.7. Генератор айс-сларі з ножами CLIS у Sunwell Japan Cord:

1 – компресор; 2 – конденсатор; 3 – дросель; 4 – випарник; 5 – барабан; 6 – розсіл; 7 – айс-сларі; 8 – рідкий холодоагент; 9 – газ холодоагент; 10 – крило приміщення.

Вакуумні системи заморожування. Вакуумні випарники заморожування засновані на зниженні температури при вакуумуванні. Водний розчин знаходиться у вакуумній камері, де тиск підтримується трохи нижче потрібної точки розчину. Процес є адіабатичним, і тому тепло випаровування відводиться з розчину, де і формуються крижані кристали айс-сларі. Пери води і неконденсованих газів видаляються з резервуара. Це може бути досягнуте прямо або побічно.

Пряма вакуумна система. Пари води і неконденсовані гази видаляються з резервуара, стискаються в компресорі і конденсуються з використанням води або холодного повітря. Хоча кількість пари, виробленої в резервуарі випаровування, може бути маленькою, низький тиск і великий питомий об'єм пари води вимагають використання компресорів з великими об'ємними витратами (Paul, 1996). Схема вакуумної системи наведена на рис. 4.8.

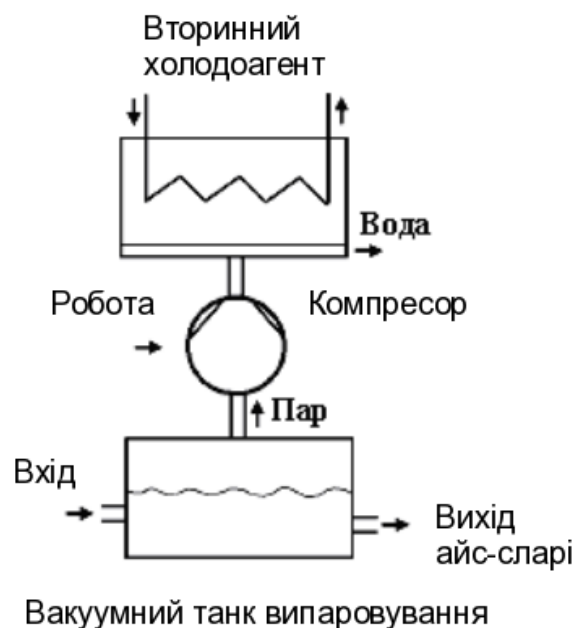


Рис. 4.8 Пряма вакуумна система

Непряма вакуумна система. Компресор можна виключити, застосовуючи теплообмінник. Пара видаляється і конденсується або заморожується на поверхні випарника (десублімація). Випарник з'єднаний з первинним циклом охолодження. Неконденсовані гази видаляються вакуумним насосом. Айс-сларі може формуватися при температур $0 - -20^{\circ}\text{C}$, залежно від використовуваних домішок (Zakeri, 1997). Якщо відбувається десублімації пари, необхідно періодично розморожувати теплообмінну поверхню. Схема непрямої системи показана на рис. 4.9.

Непрямі системи можуть використовувати домішки, що зменшують точку замерзання робочої речовини, наприклад етанолу. Концентрація етанолу в паровій фазі вища, ніж в айс-сларі, що знижує точку замерзання конденсованого розчину у порівнянні з айс-сларі.

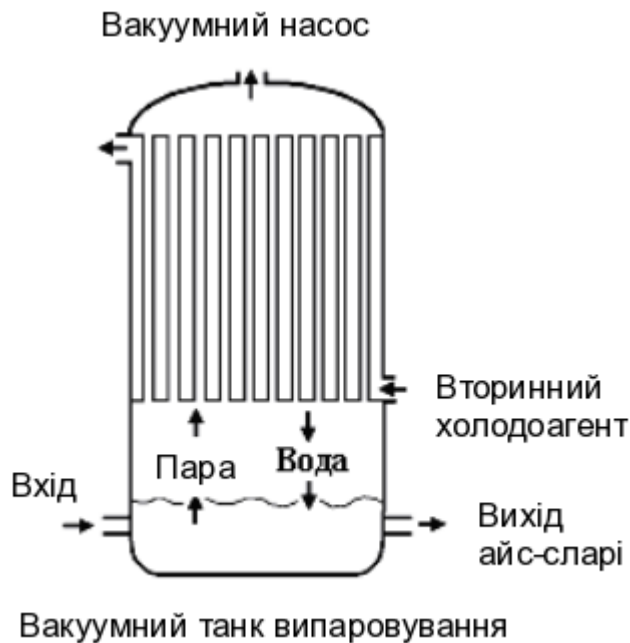


Рис. 4.9. Непряма вакуумна система

Генератор айс-сларі прямого контакту. У генераторі айс-сларі прямого контакту первинний охолоджувач (рис. 4.10), низького тиску вводиться в водний резервуар, де він випаровується. Вода розпорошується форсунками і при взаємодії з холодоагентом перетворюється у дрібні кристали. Айс-сларі формується рівномірно по об'єму камери; на форсунках не повинен формуватися крижаний шар. Додаткове перемішування мішалкою забезпечує гомогенність айс-сларі.

Процес видалення айс-сларі, сформованого в резервуарі, може бути важким, тому що охолоджувач повинен повністю залишитися у системі. Схема показана на рис. 4.10 (Wobst і Wollmer, 1999). Головна перевага прямого контакту полягає в тому, що не існує фізичної межі між охолоджувачем і айс-сларі, що спрощує конструкцію і збільшує теплопередачу. Якщо виникає проблема формування фізичної межі між охолоджувачем і розчином, можна використовувати схему, описану Fukusako та ін. (1999). В цьому випадку охолоджується нерозчинна рідина, яка розпорошується в воді. Нерозчинна рідина повинна мати більш високу щільність, ніж вода, і нижчу температуру замерзання (Fukusako та ін., 1999; Inaba, 2001).

Переохолоджувач. Потік води при повільному охолодженні може бути переохолоджений нижче від нормальної точки замерзання без формування твердої фракції на стінці (рис. 4.11). На виході з випарника переохолодженої води формуються крижані кристали. Крижана фракція залежить від переохолодження рідини на виході та визначається пропорційно $1,25 \% / ^\circ\text{C}$ переохолодження.

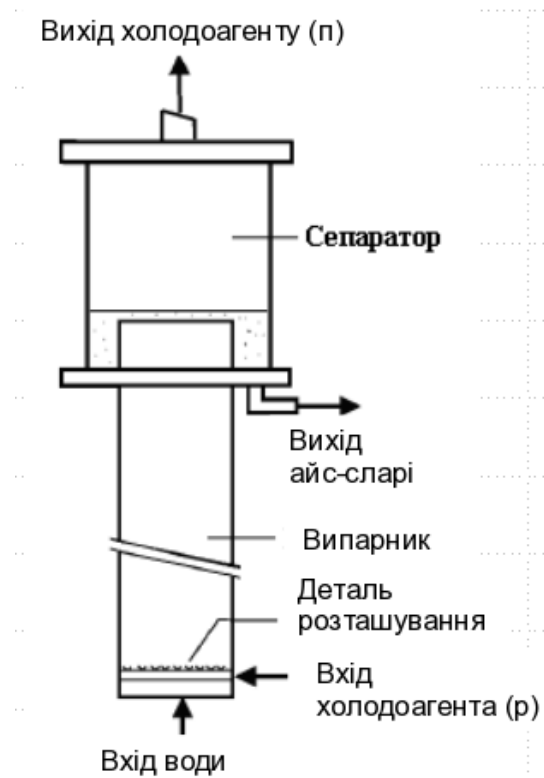


Рис. 4.10. Генератор айс-сларі прямого контакту (Wobst і Wollmer, 1999)

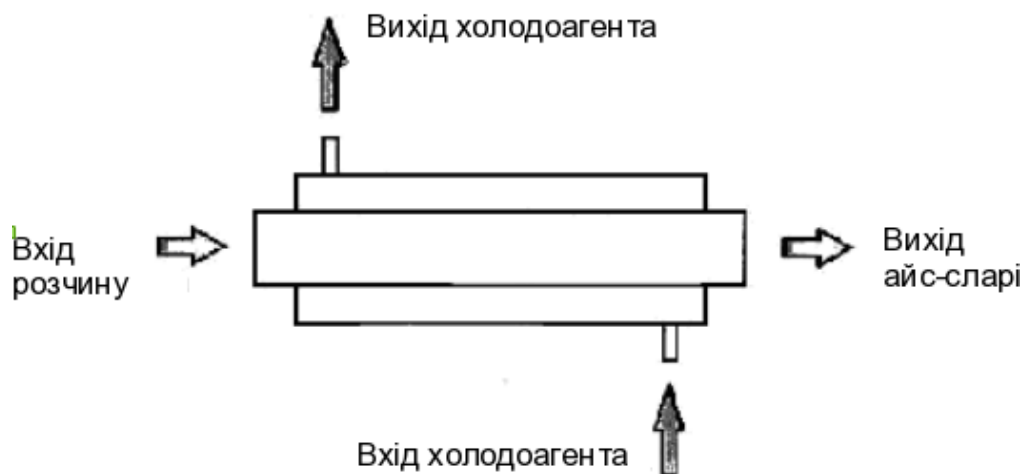


Рис. 4.11. Переохолоджувач

Система з ежектором. Система з ежектором (рис. 4.12) базується на теплообміні між двома рідинами. Рідина, що не змішується, важча за воду та охолоджується нижче від температури заморожування води. Рідина при високому тиску проходить через ежектор і всмоктує воду з резервуара. При взаємодії рідини з водою утворюються крижані кристали. Суміш надходить в збірний резервуар, де більш легкі крижані кристали спливають вгору.

Плівковий генератор айс-сларі. Льдогенератор заснований на формуванні шару льоду в плівці, що стікає, і видаленні її обертовим стрижнем, який взаємодіє в поверхню випарника (рис. 4.13). Між стрижнем і стінкою труби немає тертя, тому що айс-сларі виконує роль мастила.

Інші способи отримання айс-сларі. Одним з них є, наприклад, отримання льоду на змійовику. Холодоагент або водний розчин гліколю при температурі $-4 - -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ циркулює в змійовику, зануреному в резервуар з водою для формування льоду (рис. 4.14). Крижаний резервуар складається з повітряного насоса низького тиску або мішалки для створення розподілу танення і формування льоду. Товщина льоду вимірюється датчиком.

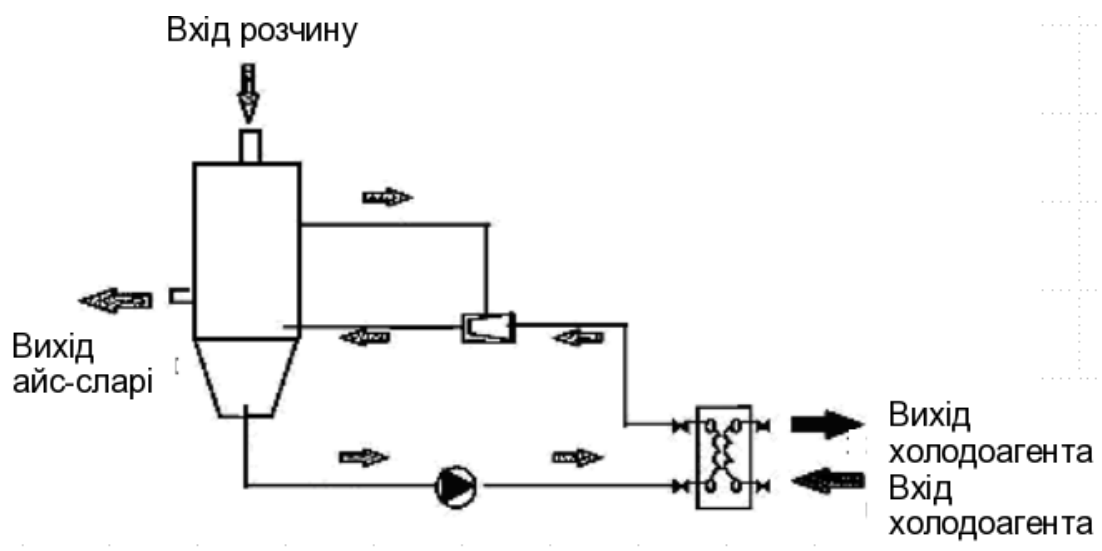


Рис. 4.12. Генератор айс-сларі з ежектором

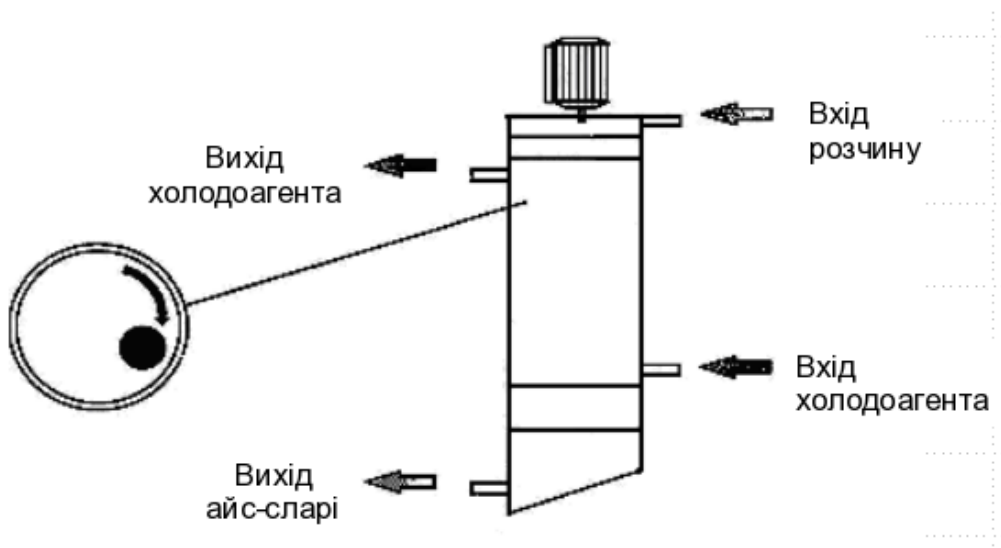


Рис. 4.13. Плівковий генератор айс-сларі

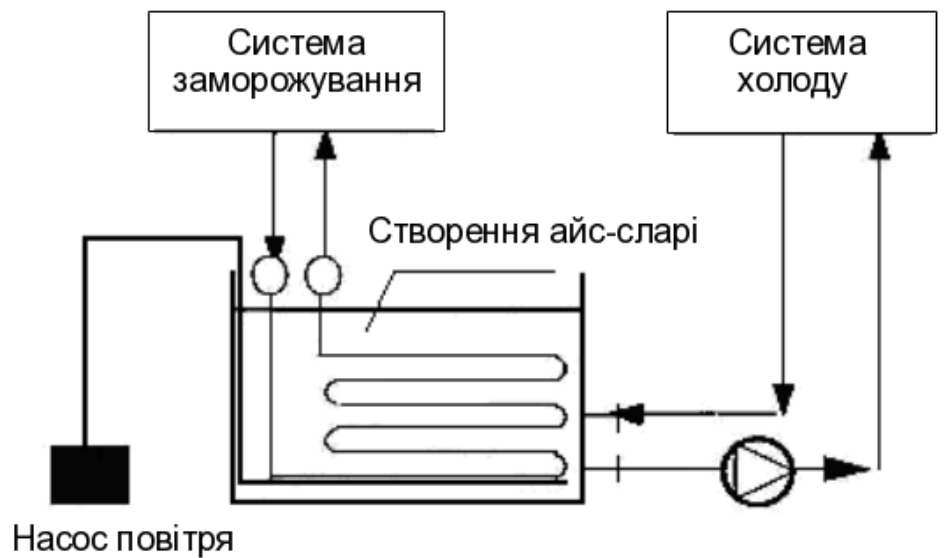


Рис. 4.14. Крижаний пристрій

Питання до розділу 4

1. Опишіть генератор айс-сларі з флюїдизованим шаром.
2. Опишіть принцип роботи флюїдизованого шару генератора айс-сларі.
3. Що таке стаціонарна флюїдизація?
4. Як визначається оптимальна порізненість шару?
5. Що таке циркулюючий флюїдизований шар генератора айс-сларі?
6. Опишіть механізми теплопередачі від стінки до флюїдизованого шару у генераторі айс-сларі.
7. Опишіть математичну модель генератора з флюїдизованим шаром.

8. Опишіть експериментальну установку для дослідження процесів у флюїдизованому шарі.
9. Опишіть відомі вам типи генераторів айс-сларі.
10. Опишіть принцип роботи генератора айс-сларі з ежекторами. Для чого використовуються ежектори?

5. ЗБЕРІГАННЯ І ТРАНСПОРТУВАННЯ АЙС-СЛАРІ

5.1. Зберігання

На рис. 5.1 наведено залежності об'єму танків, які можуть зберігати 2000 МДж холоду для різних депресантів при температурах -5 - -20 $^{\circ}\text{C}$, від концентрації льодової фракції, які показують, що тип депресанту та температура зберігання не впливають на об'єм танків. Передбачається, що кількість збереженого холоду в резервуарі дорівнює кількості тепла повністю розтопленого льоду в посудині для зберігання, включаючи латентне і видиме тепло діапазону замерзання.

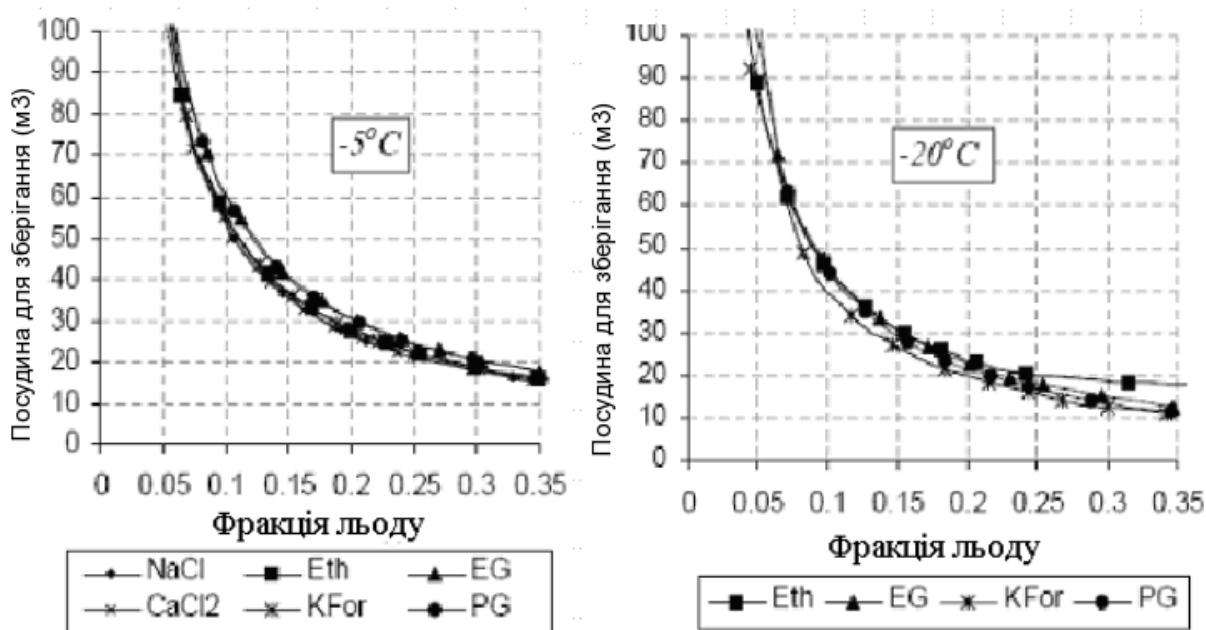


Рис. 5.1 Резервуар для зберігання холоду при $T = -5^{\circ}\text{C}$ та $T = -20^{\circ}\text{C}$

Втрати тепла через стінки посудини для зберігання можуть бути обмежені за рахунок використання високих фракцій льоду (малий резервуар для зберігання). Таким чином, втрати тепла в резервуарі для зберігання відносно малі стосовно, наприклад, труби для транспорту, де співвідношення площі з об'ємом буде набагато вищим.

Опір стінки резервуара щодо теплопередачі може бути значно і ефективно покращений завдяки ізоляції. Властивості айс-сларі усередині резервуара тільки злегка впливають на втрати тепла. Повний коефіцієнт

теплопередачі для втрат тепла $1 - 3 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ є типовим для ізольованого перемішуючого резервуара. Це забезпечує шар ізоляції $1 - 3 \text{ мм}$ з теплопровідністю $0,03 \text{ Вт/мк}$. Втрати тепла головним чином залежать від проекту резервуару, ізоляції і є різними для різних айс-сларі [6].

5.2. Гомогенне і гетерогенне перемішування айс-сларі

Існує два методи, зберігання айс-сларі в ізольованому резервуарі: гомогенний і гетерогенний [10].

1) Гомогенне зберігання

Коли застосовується гомогенне зберігання, айс-сларі безперервно перемішується в резервуарі (рис. 5.2) вертикальним перемішуючим пристроєм, який розміщено несиметрично. Крістенсен та Кофельд (Christensen and Kauffeld) проводили дослідження, в яких перемішували айс-сларі з фракцією льоду 35% . Впродовж зберігання середній розмір кристала зростає і тому важче було утримувати айс-сларі гомогенним.

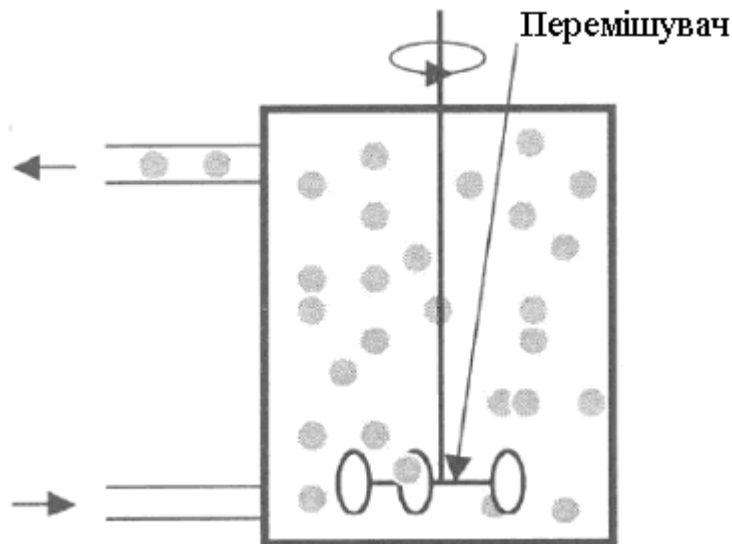


Рис. 5.2. Гомогенне зберігання айс-сларі

До недоліків гомогенного зберігання відносяться витрати енергії на перемішування, які збільшують повне енергоспоживання, і тепловитрати на вході у систему айс-сларі. Крістенсен та Кофельд показали, що для перемішування айс-сларі у резервуарі $8,5 \text{ м}^3$ необхідно витратити $0,7 \text{ кВт}$ енергії.

Вхідне тепло від зусилля перемішування призводить до зниження фракції айс-сларі приблизно на 0,1 % на годину.

2) Гетерогенне зберігання

У посудині для гетерогенного зберігання немає перемішуючих дій, і тому кристали льоду акумулюють у верхній частині резервуара (рис. 5.3) [11]. При використанні холодоносія кристали льоду залишаються в резервуарі. Після поглинання тепла розсол подається у верхню частину резервуару з розбризкуванням.

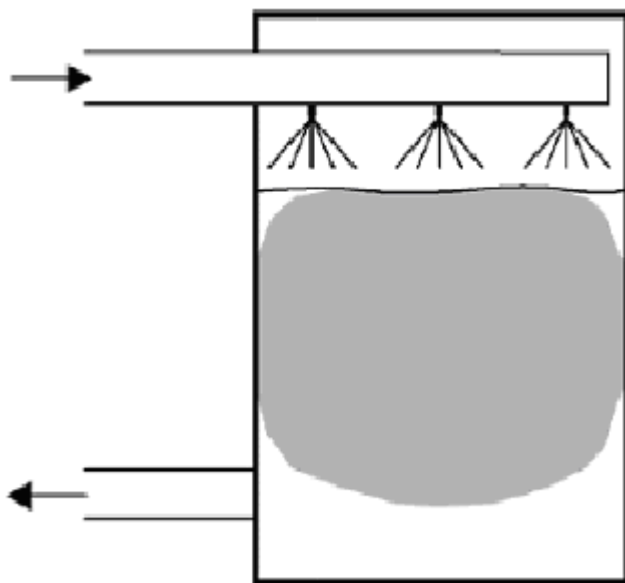


Рис. 5.3. Гетерогенне зберігання айс-сларі

Головною перевагою такого зберігання є те, що не потрібен перемішуючий пристрій, а це зберігає енергоспоживання і зменшує вхід тепла, в порівнянні з гомогенним зберіганням. Не дивлячись на те, що айс-сларі не перемішується, розмір кристалів збільшується завдяки оствальдському дозріванню.

У даному пристрої лід застосовується тільки для зберігання, тому що кристали льоду не нагнітаються через транспортну трубу. Виграш від айс-сларі для теплового транспортування щодо зменшення діаметруа труб і високих коефіцієнтів теплопередачі в теплообмінниках не використовується.

Щоб усунути згаданий недолік, був запропонований резервуар без перемішуючого пристрою (рис. 5.4). Оскільки не застосовується перемішування, формується товстий шар льоду на поверхні айс-сларі. Кристали льоду переміщуються гвинтовим насосом з цього шару і згодом перемішуються з рідиною знизу посудини. Спеціальний клапан гарантує повний контроль над крижаною фракцією.

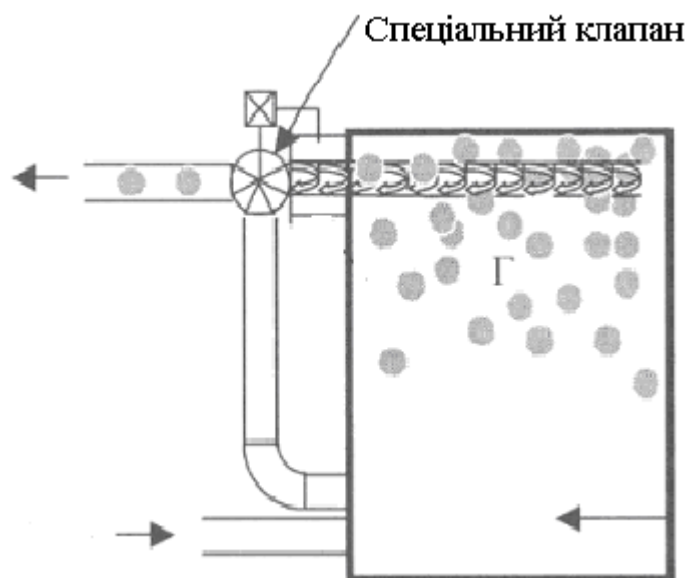


Рис. 5.4. Гетерогенне зберігання айс-сларі з перемішуючим пристроєм

5.3. Транспортування айс-сларі

При транспортуванні айс-сларі визначаються головним чином теплоємність, втрати тепла і витрати сили нагнітання. При високих значеннях теплоємності діаметр труб системи транспортування холоду можна зменшити, втрати тепла через площу стінок труб теж будуть зменшені. Зменшення діаметра підвищує втрати тиску та вхідну потужність нагнітання. Таким чином, в моделі потрібна оптимізація крижаної фракції і діаметра труб щодо транспортної труби вторинного циклу охолодження.

Необхідні діаметри труби (рис. 5.5), головним чином, визначаються крижаною фракцією, а депресант є відносно маловизначальним [6].

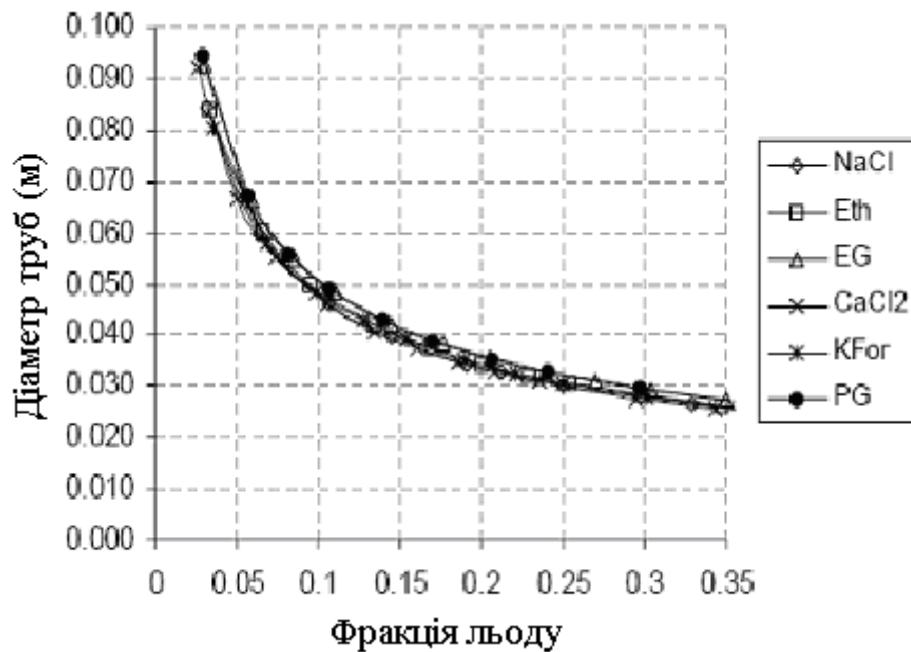


Рис. 5.5. Необхідні діаметри труб при швидкості 1,5 м/с

5.4 Айс-сларі у вторинних системах охолодження

Для збірної холодильної камери низьких температур типу КХН10 розміром 2400x2400x2340 мм необхідно забезпечити холодопродуктивність $Q=1120$ Вт. Для цього потрібно розрахувати повітроохолоджувач, провести гідравлічний розрахунок системи. Також необхідно порівняти отримані результати для холодоносія CaCl_2 і айс-сларі (витрати, коефіцієнти теплообміну і гідравлічні втрати). На рис. 5.6 наведено схему системи охолодження.

Методика розв'язання задачі

Спочатку вибираємо конструкцію системи охолодження і розраховуємо площу повітроохолоджувача. Припускаємо, що в камері процес охолодження відбувається через природну конвекцію, тоді розрахунок ведеться по наступній методиці:

1) Розраховуємо витрату холодоносія в системі:

- для айс-сларі – за формулою

$$G = \frac{Q}{i_2 - i_1}, \quad (5.1)$$

де Q – холодопродуктивність камери, Вт; i_1 та i_2 - ентальпії айс-сларі на вході і виході з повітроохолоджувача, що вибираються залежно від процентного вмісту льоду в холодоносії. В нашому випадку початкова концентрація становить 20 %, а кінцева – 5 %.

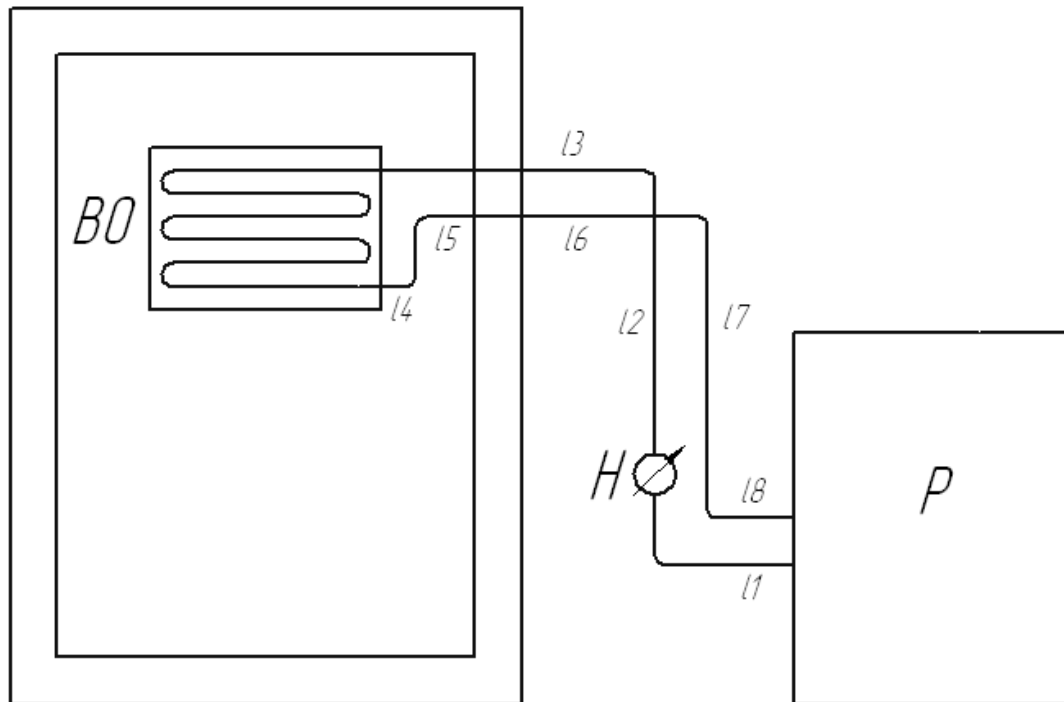


Рис. 5.6 – Схема конструкції системи охолодження:

В – повітроохолоджувач; Н – насос; Р – резервуар; l1-l8 – відповідні довжини ділянок трубопроводу.

- для CaCl_2 – за формулою

$$G = \frac{Q}{C_p \cdot (T_{\text{вих}} - T_{\text{вх}})} \quad (5.2)$$

де C_p – середня теплоємність CaCl_2 , Дж/(кг*К);

$T_{\text{вх}}$, $T_{\text{вих}}$ - температури входу і виходу CaCl_2 відповідно, $^{\circ}\text{C}$.

2) Розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі при природній конвекції з боку поверхні, яка має ребра [22]:

$$Nu = 0,54 \cdot C \cdot Ra^{\frac{1}{4}}, \quad (5.3)$$

де C – вилучина, що вибирається залежно від відношення D_1/D_2 (D_1, D_2 – діаметри труби і ребра відповідно);

Ra – число Релея:

$$Ra = Gr \cdot Pr, \quad (5.4)$$

$$Gr = \frac{\beta \cdot d^3 \cdot g \cdot \Delta t}{\nu^2}, \quad (5.5)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}, \quad (5.6)$$

де C_p – теплоємність повітря, Дж/(кг*К);

λ – теплопровідність повітря, Вт/(м*К)

3) Обчислюємо коефіцієнт тепловіддачі для айс-сларі:

- при ламінарному режимі:

$$Nu = 38,3 \cdot Gr^{0,15} \cdot w_i^{0,52}, \quad (5.7)$$

де $3 < Re < 2000$ і $0,04 < w_i < 0,35$;

- при турбулентному режимі:

$$Nu = 0,027 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{wall}} \right)^{0,14}, \quad (5.8)$$

$$Re = \frac{4 \cdot G}{\pi \cdot d_{vn} \cdot \mu}, \quad (5.9)$$

а також для холодоносія $CaCl_2$:

- при ламінарному режимі [23]:

$$Nu = 1,61 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d_{vn}}{l_{tr}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5.10)$$

де d_{vn} – внутрішній діаметр труби, м;

l_{tr} – довжина труби, м.

- при турбулентному режимі [23]:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}. \quad (5.11)$$

4) Оскільки труби мають ребра, то потрібно враховувати коефіцієнт ефективності ребра [24]

$$\eta = \frac{th(m \cdot lp)}{m \cdot lp}, \quad (5.12)$$

де m – комплексна характеристика ребра:

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\lambda \cdot \delta}}; \quad (5.13)$$

δ – товщина ребра, м;

λ – теплопровідність матеріалу труби, Вт/(м*К);

l_p – умовна висота ребра:

$$l_p = h \cdot (1 + 0,35 \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)). \quad (5.14)$$

5) Обчислюємо коефіцієнт теплопередачі:

$$k = \frac{1}{d_n \left(\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_n \cdot \eta} \cdot \frac{F_{\text{вн}}}{F_3} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_n}{d_{\text{вн}}}\right) + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{\text{вн}}} \right)}, \quad (5.15)$$

де: $F_{\text{вн}}$, F_3 – площі внутрішньої і зовнішньої поверхні труби відповідно.

6) Розраховуємо площу повітроохолоджувача:

$$F = \frac{Q}{k \cdot (T_k - T_r)}, \quad (5.16)$$

де: T_k , T_r – температура в камері і температура розсолу відповідно.

7) Визначаємо кількість труб повітроохолоджувача:

$$n = \frac{F}{l \cdot F_3}. \quad (5.17)$$

8) Для розрахунку гідравлічних втрат в системі визначаємо густину холодоносія, динамічну і кінематичну в'язкість, площі поперечного перетину і швидкості руху потоку для кожної ділянки гідравлічної системи.

Густину айс-сларі визначаємо з густини чистого льоду і густини рідкого розчину:

$$\rho_{is} = \frac{1}{w_i / \rho_i + (1 - w_i) / \rho_l} \quad (5.18)$$

Динамічну в'язкість обчислюємо за формулою

$$\mu_{is} = \mu_l \cdot (1 + 2,5 \cdot \phi_i + 10,05 \cdot \phi_i^2 + 0,00273 \cdot (e^{(16,6 \cdot \phi_i)} - 1)), \quad (5.19)$$

а кінематичну в'язкість – за формулою:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5.20)$$

Для холодоносія CaCl_2 в'язкість, теплоємність теплопровідність і густину беремо з довідника [18].

Площа поперечного перетину

$$F = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (5.21)$$

Швидкість холодоносія в каналах

$$\omega = \frac{G}{F \cdot \rho} \quad (5.22)$$

9) Для кожної ділянки визначаємо значення числа Рейнольдса Re:

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot G}{\pi \cdot d \cdot \mu} \quad (5.23)$$

Залежно від значення цього числа визначаються коефіцієнти гідравлічного опору тертя ξ для кожної ділянки. Надалі отримані значення використовуються для знаходження втрат тиску на тертя, які визначаються за формулою Дарсі - Вейсбаха:

$$\Delta P_{mp} = \frac{\xi \cdot \rho \cdot \omega^2}{2} \cdot \frac{l}{d} \quad (5.24)$$

Також в гідравлічній системі визначаються коефіцієнти місцевого гідравлічного опору на поворотах ζ . Для зігнутих ділянок ця величина визначається за такою залежністю [25]:

$$\zeta = A_1 \cdot B_1 \cdot C_1. \quad (5.25)$$

де A_1 – коефіцієнт, що враховує вплив зігнутості відведення;

B_1 – коефіцієнт, що враховує вплив відносного радіуса;

C_1 – коефіцієнт, що враховує вплив відносної витягнутості поперечного перетину відведення (для круглого перетину $C=1$).

Для коліна маємо

$$\zeta = (0,95 + \frac{33,5}{\delta}) \cdot (0,95 \cdot \sin^2 \frac{\delta}{2} + 2,05 \cdot \sin^4 \frac{\delta}{2}). \quad (5.26)$$

Далі отримані значення використовуються для знаходження місцевих втрат тиску на поворотах:

$$\Delta P_m = \zeta \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}. \quad (5.27)$$

10) Розраховуємо втрати тиску на подолання підйому до найвищої точки системи:

$$\Delta P_h = \rho \cdot H \cdot g, \quad (5.28)$$

де: H – висота підйому рідини насосом.

11) На підставі всіх отриманих даних визначаємо сумарні втрати тиску у всій системі:

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_{tp} + \Delta P_h. \quad (5.29)$$

Результати розрахунку

Розрахунок проводився в пакеті Mathcad. Для його виконання були вибрані початкові дані, наведені в табл. 5.1 - 5.3:

Таблиця 5.1 - Початкові дані

Холодопродуктивність камери, Вт	Q	1120
Температура входу холодоносія CaCl_2 у	$T_{\text{вх}}$	-20

повітроохолоджувач, $^{\circ}\text{C}$		
Температура виходу холодоносія CaCl_2 з повітроохолоджувача, $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{вих}}$	-15
Температура айс-сларі, що циркулює у повітроохолоджувачі, $^{\circ}\text{C}$	T_r	-20
Температура в холодильній камері, $^{\circ}\text{C}$	T_k	-10
Довжина труби повітроохолоджувача, м	t_{tr}	1,5

Таблиця. 5.2 - Теплофізичні параметри

Теплопровідність труби, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	λ_{tr}	45,4
Теплопровідність холодоносія CaCl_2 , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	λ	0,519
Теплоємність холодоносія CaCl_2 , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	C_p	2950
Густина холодоносія CaCl_2 , $\text{кг}/\text{м}^3$	ρ	1220
В'язкість холодоносія CaCl_2 , $\text{Па}\cdot\text{с}$	μ	0,00947

Таблиця 5.3 - Довжини ділянок трубопроводу

l1	l2	l3	l4	l5	l6	l7	l8
3	2	1	0,5	0,5	1	1,9	3

Розрахунок був проведений для айс-сларі і холодоносія CaCl_2 за умови, що в холодильній камері відбувається природна конвекція. Результати розрахунку показали, що витрати холодоносіїв за однакових умов бувають різними: для айс-сларі – 0,024 $\text{кг}/\text{с}$, для CaCl_2 - 0,076 $\text{кг}/\text{с}$. Дослідження було проведено для труб діаметром 9,3x0,8 мм, 15x0,8мм і 22x1,5 мм. Характеристики труб наведено в табл. 5.4

Таблиця 5.4 - Характеристики труб

Діаметр труби, мм	9,3x0,8	15x0,8	22x1,5
Діаметр ребра, мм	16,5	29,5	40
Крок ребра, мм	2,2	3,5	8
Товщина ребра, мм	0,5	0,5	1

Розрахунок показує, що при збільшенні діаметра труби гідравлічні втрати в системі і коефіцієнти тепловіддачі зменшуються. Залежність зміни гідравлічних втрат і коефіцієнтів тепловіддачі від діаметрів наведено на рис. 5.7 і рис. 5.8. Результати розрахунку - в табл.. 5.5.

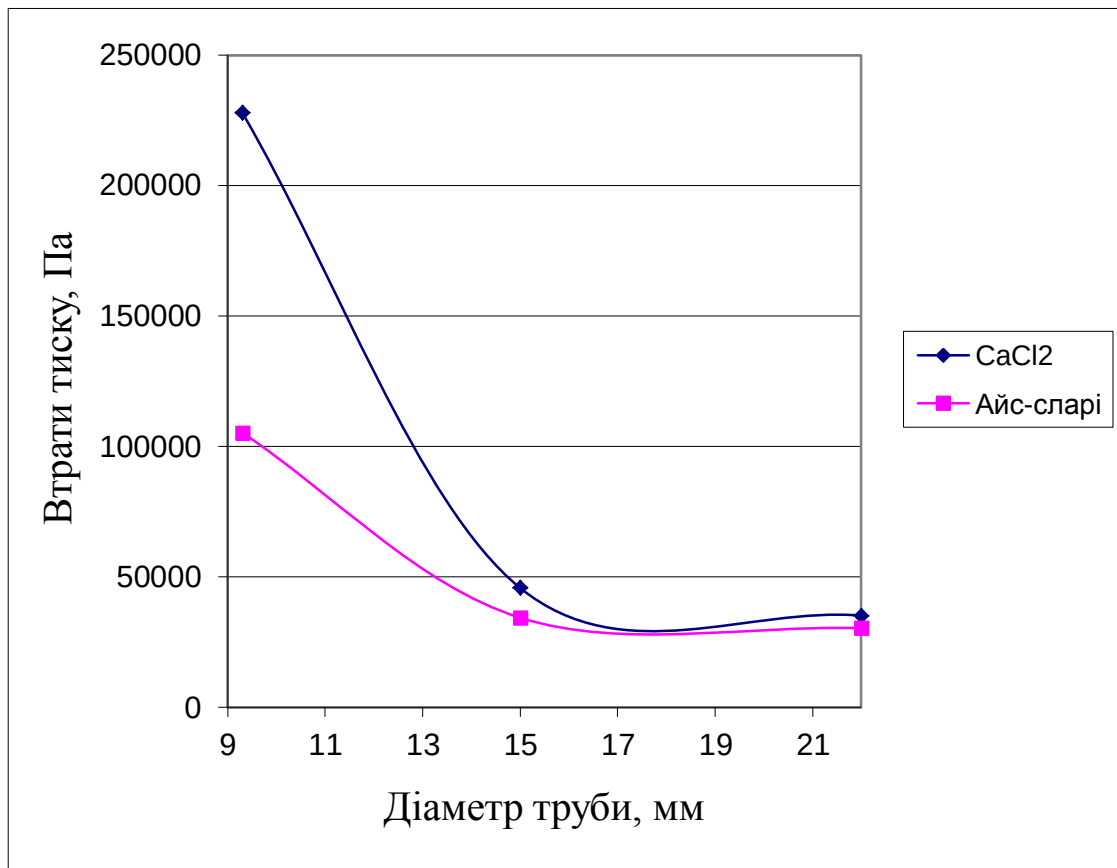


Рис. 5.7. Залежність втрати тиску від діаметра труб

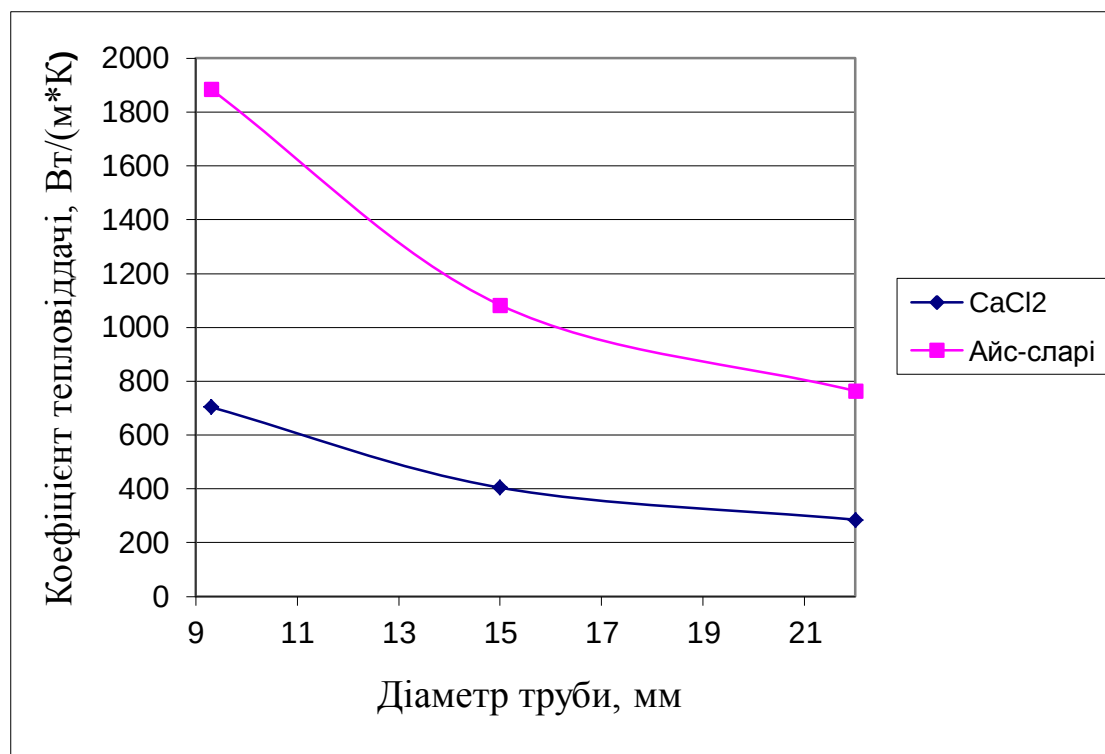


Рис. 5.8. Залежність коефіцієнта тепловіддачі від діаметра труб

Таблиця 5.5 - Результати розрахунку

Параметри		Айс-сларі			CaCl ₂		
Діаметр труби, мм	d	9,3x0,8	15x0,8	22x1,5	9,3x08	15x0,8	22x1,5
Витрата, кг/с	G	0,024			0,076		
Коефіцієнт теплоотдачі для повітря, Вт/(м ² *К)	$\alpha_{\text{воз}}$	12,806	11,527	10,476	12,089	10,727	9,748
Коефіцієнт тепловідачі для холодоносія, Вт/(м ² *К)	α	1885	1083	763,76	703,67	404,95	285,17
Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м ² *К)	k	78,471	80,519	44,837	67,96	66,757	37,926
Площа поверхні теплообміну, м ²	F	1,613	1,572	2,821	2,483	2,528	4,449
Кількість труб повітроохолоджувача, шт	n	7	3	7	11	5	11
Гідравлічні втрати тиску в повітроохолоджувача, Па	ΔP_{vo}	36760	1715	991,61	94640	4666	2789
Гідравлічні втрати тиску в трубах, Па	$\Delta P_{\text{труб}}$	40270	4390	1086	103400	11270	2788
Гідравлічні втрати тиску на подолання підйому до найвищої точки системи, Па	ΔP_h	28300			29899		
Загальні гідравлічні втрати тиску в системі, Па	ΔP	105300	34410	30380	227900	45830	35230

Як показують графіки, гідравлічні втрати тиску для айс-сларі менші, ніж для холодоносія CaCl₂ в 1,3 – 2,2 рази, коефіцієнти теплообміну більші в 2,7 рази. Використання водольодяної суміші дозволяє скоротити кількість труб

повітроохолоджувача залежно від діаметра на 2 - 4 штуки (20 – 30 %) і також можна використовувати труби меншого діаметра, що дає економію матеріалів.

5.5. Системи з використанням рідкого льоду

Розглянемо існуючі холодильні системи, в яких використовується рідкий лід.

5.5.1. Флюїдизаційне заморожування продуктів

Схема флюїдизаційного заморожування наведена на рис. 5.9. [26] Особливістю заморожування є подача рідкого льоду в нижню частину камери, що забезпечує зважене розміщення продукту, що заморожується (псевдозрідження).

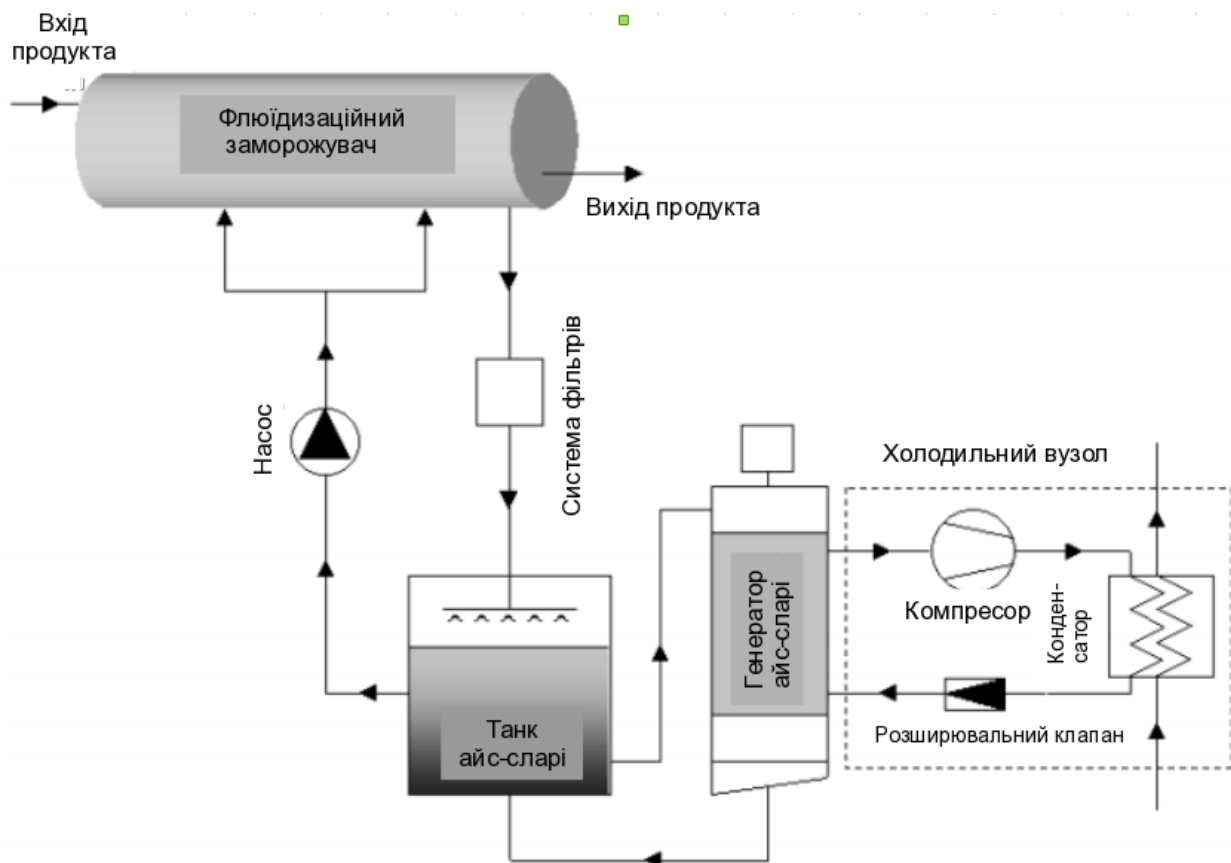


Рис. 5.9. Флюїдизаційне заморожування продуктів

Таке заморожування характеризується високими коефіцієнтами теплообміну і невеликими температурними напорами, що впливає на швидкість заморожування. Це дозволяє швидко пройти критичну зону кристалізації води в продукті та зберегти високу якість продукту, скоротити втрати вологи в ньому.

Використання спеціальних харчових депресантів дозволяє надати продукту нові смакові якості і поживну цінність.

Флюїдизаційне охолодження легко автоматизується, не потребує великих витрат енергії і характеризується мінімальним механічним впливом на продукт.

Система заморожування риби з використанням рідкого льоду наведена на рис. 5.10 [26]

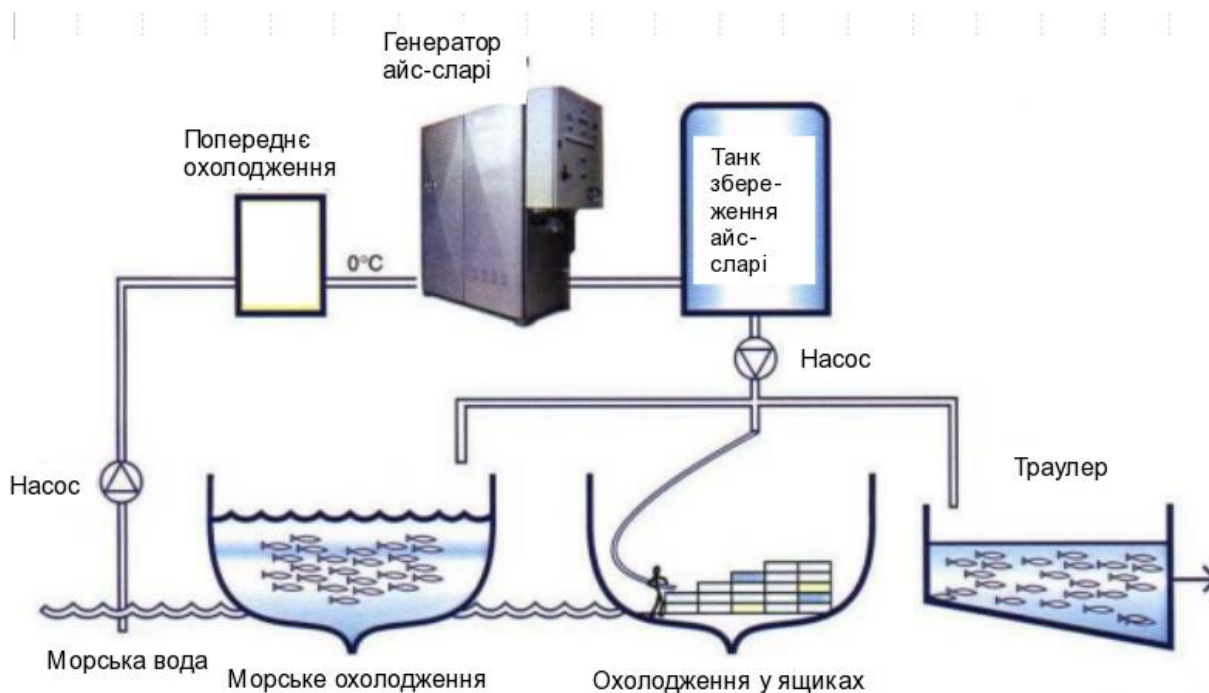


Рис. 5.10. Заморожування риби з використанням рідкого льоду

5.5.2. Повітряна система отримання рідкого льоду

Схема отримання рідкого льоду показана на рис. 5.11. [27] Система складається з трьох частин: випарного циклу з попереднім охолодженням; циклу глибокого осушення; циклу випарного переохолодження.

Випарний цикл охолоджує воду і повітря. Після цього охолоджену воду подають в резервуар для води при температурі 0 °С, а холодне повітря з високою вологістю подається у цикл глибокого осушення рідинного вологопоглинача. Цикл осушення в основному використовується для зниження вологості повітря, яке використовується в випарному циклі попереднього охолодження. Температура повітря зростає під час процесу осушення, тому потрібно використовувати теплообмінник. Охолоджена вода і осушене холодне

повітря надходять в камеру виробництва льоду для завершення циклу випарного переохолодження. У камері вода розпорошується і переохолоджується з подальшим формуванням кристалів льоду.

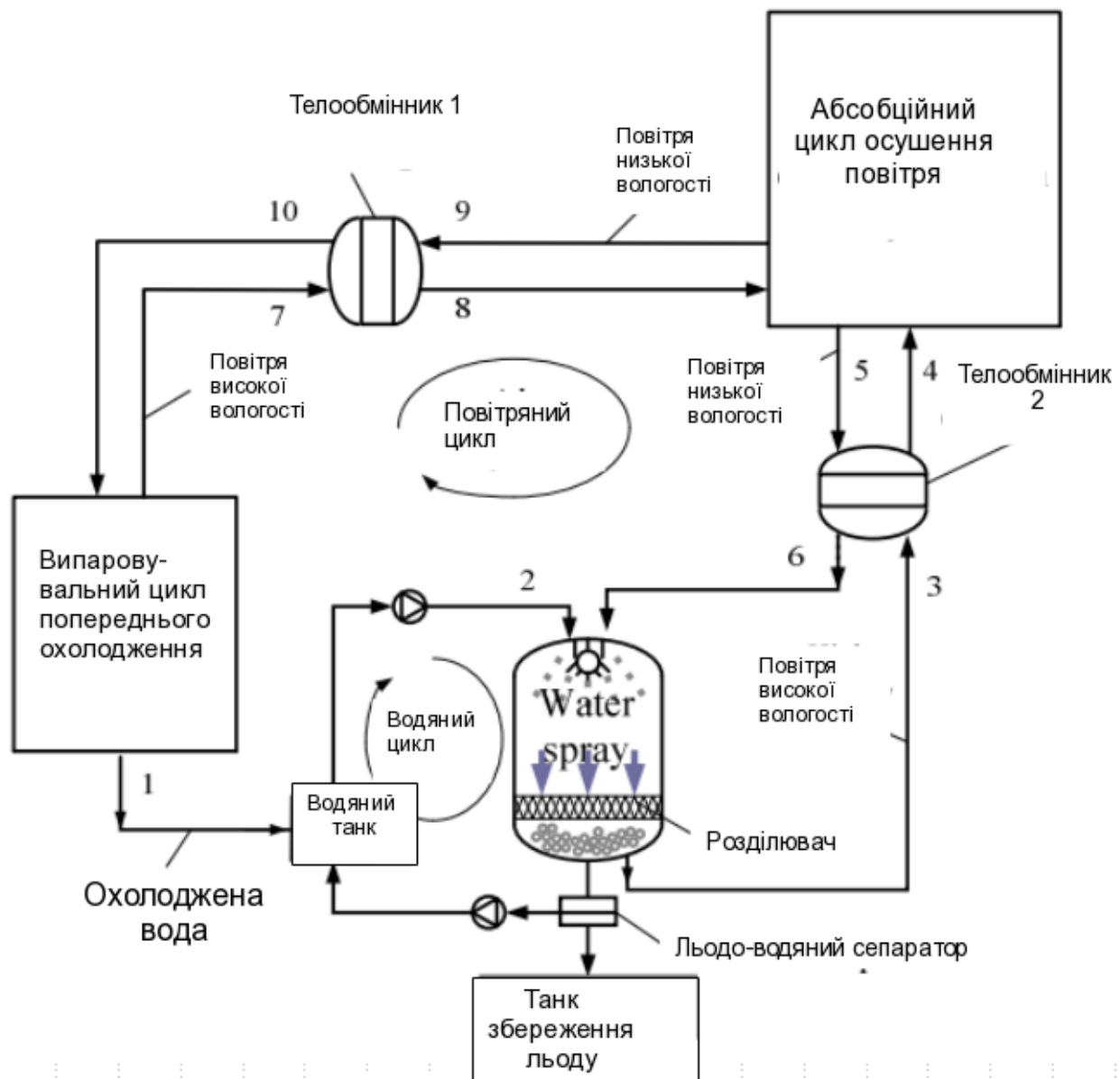


Рис. 5.11. Повітряний цикл виробництва рідкого льоду

5.5.3. Отримання рідкого льоду з використанням вакууму

Як показано на рис. 5.12, вакуумна система одержання рідкого льоду складається з трьох робочих підсистем: підсистеми виробництва рідкого льоду; звичайної підсистеми охолодження; вакуумної підсистеми зі струминними насосами. Останні дві підсистеми забезпечують підтримку вакууму [28].

У системах використовується ежектор для підвищення тиску без споживання механічної енергії. У ежекторі для отримання високо потенційного потоку можна використовувати низькотемпературну теплову енергію, наприклад сонячну, або відпрацьоване тепло.

У підсистему виробництва рідкого льоду зовнішня вода закачується в вакуумний резервуар через розпилювальне сопло. Частина води перетворюється в пар при низькому тиску, який поглинає приховану теплоту випаровування води і забезпечує появу твердої фази. Частина пари з вакуумного резервуара конденсується підсистемою охолодження, а інша частина витягується для підтримки вакууму в вакуумному резервуарі.

Для підсистеми охолодження, (ліва частина рис.1) процес конденсації пари в вакуумному резервуарі здійснюється за допомогою наступних етапів. Рідкий холодоагент кипить в генераторі 1 при тиску насичення, а потім високотемпературні пари потрапляють в сопло, де вони розширюються до надзвукового потоку з падінням тиску на вихід з сопла. Різниця тисків забезпечує всмоктування парів холодоагенту з модифікованого випарника. Після змішування потоків в камері змішувача потік потрапляє у друге сопло, де тиск збільшується до робочого.

У конденсаторі змішаний пар конденсується охолоджуючою водою. Частина отриманого рідкого холодоагенту закачується насосом в генератор 1, а залишки рідини надходять в модифікований випарник через розширювальний клапан.

Для вакуумної підсистеми пара високого тиску виробляється в генераторі 2, який забезпечує роботу двох ежекторів. Ежектор 2 забезпечує низький тиск в вакуумному резервуарі, а ежектор 3 підвищує тиск пари. Роботу системи при атмосферному тиску забезпечує водяний ежектор. Отримана вода збирається в водяному танку, частина її насосом подається на водяний ежектор, а друга частина - в генератор 2.

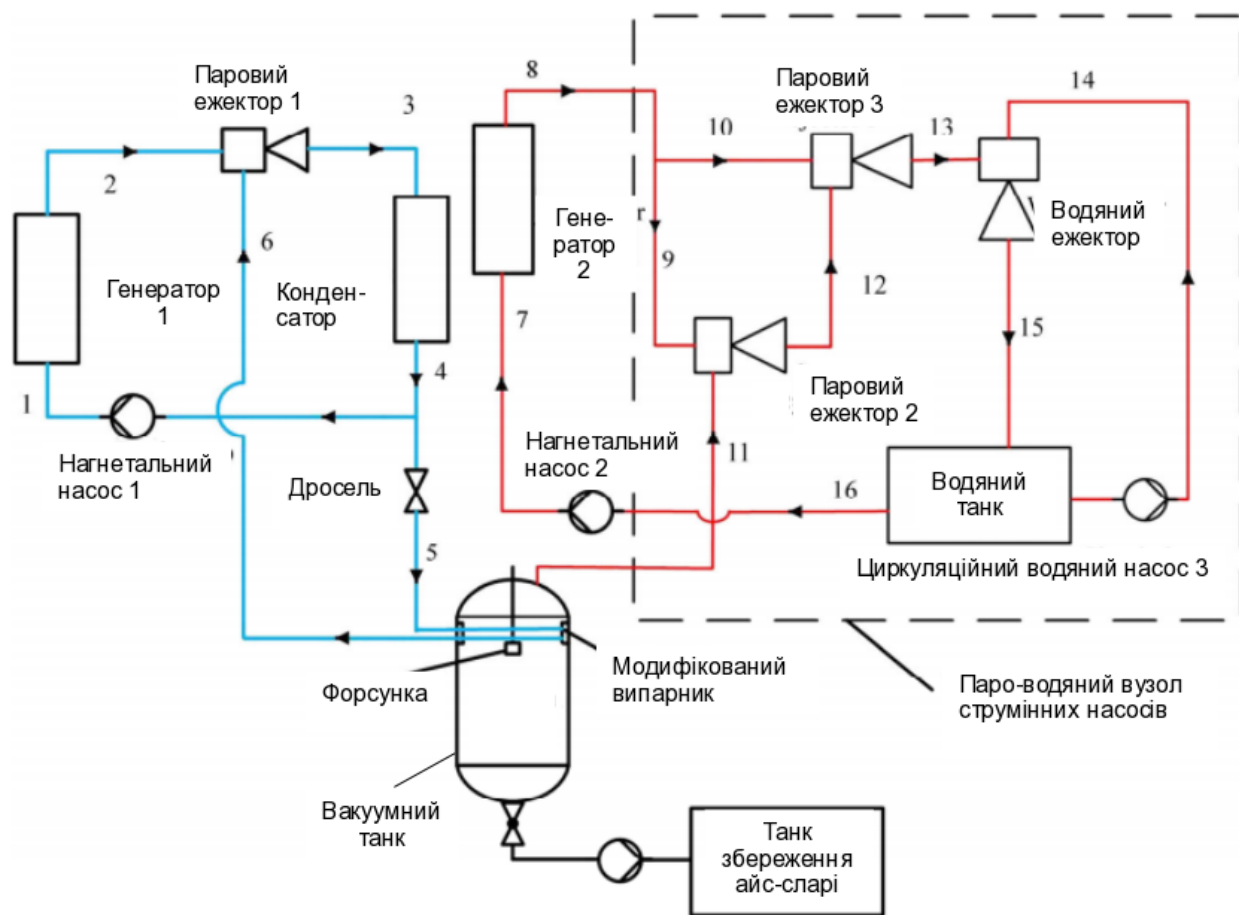


Рис. 5.12. Вакуумна система вироблення рідкого льоду

5.5.4. Застосування рідкого льоду на кухні

На великих європейських кухнях у Франції (2009), Німеччині та Ліхтенштейні встановлено кілька систем охолодження рідким льодом. У лікарняній кухні «Klinikum Stuttgart» в Німеччині використовується одна з найбільших установок з виробництва рідкого льоду в промисловості [29].

Кухня була побудована в 2007 році і виробляє до 6000 страв за день. Тут рідкий лід використовується виключно для охолодження всього ланцюжка процесу приготування та охолодження (рис. 5.13). Це охоплює все: від переохолодження посудин і холодильних камер до порційних станцій і приблизно 130 охолоджених візків для транспортування лотків з нержавіючої сталі. Завод розрахований на максимум 9000 прийомів їжі в день.

Рідкий лід на базі розчину етанолу проводиться в 16 очищених генераторах сухого льоду із загальною потужністю охолодження 185 кВт. Рідкий лід зберігають в трьох циліндричних ємностях об'ємом 22 м³ кожна.

Їжа зберігається в холодних приміщеннях, охолоджених повітряним охолоджувачем перед приготуванням. Продукти охолоджують у великих ємностях. Таке охолодження в три рази швидше, ніж звичайне.

Крім того, швидке охолодження знижує потребу у ручній обробці, митті посуду і запобігає втраті їжі. Охолоджену їжу знову зберігають в холодильних камерах до її поділу на пластикові лотки, що переміщаються на конвеєрних стрічках.

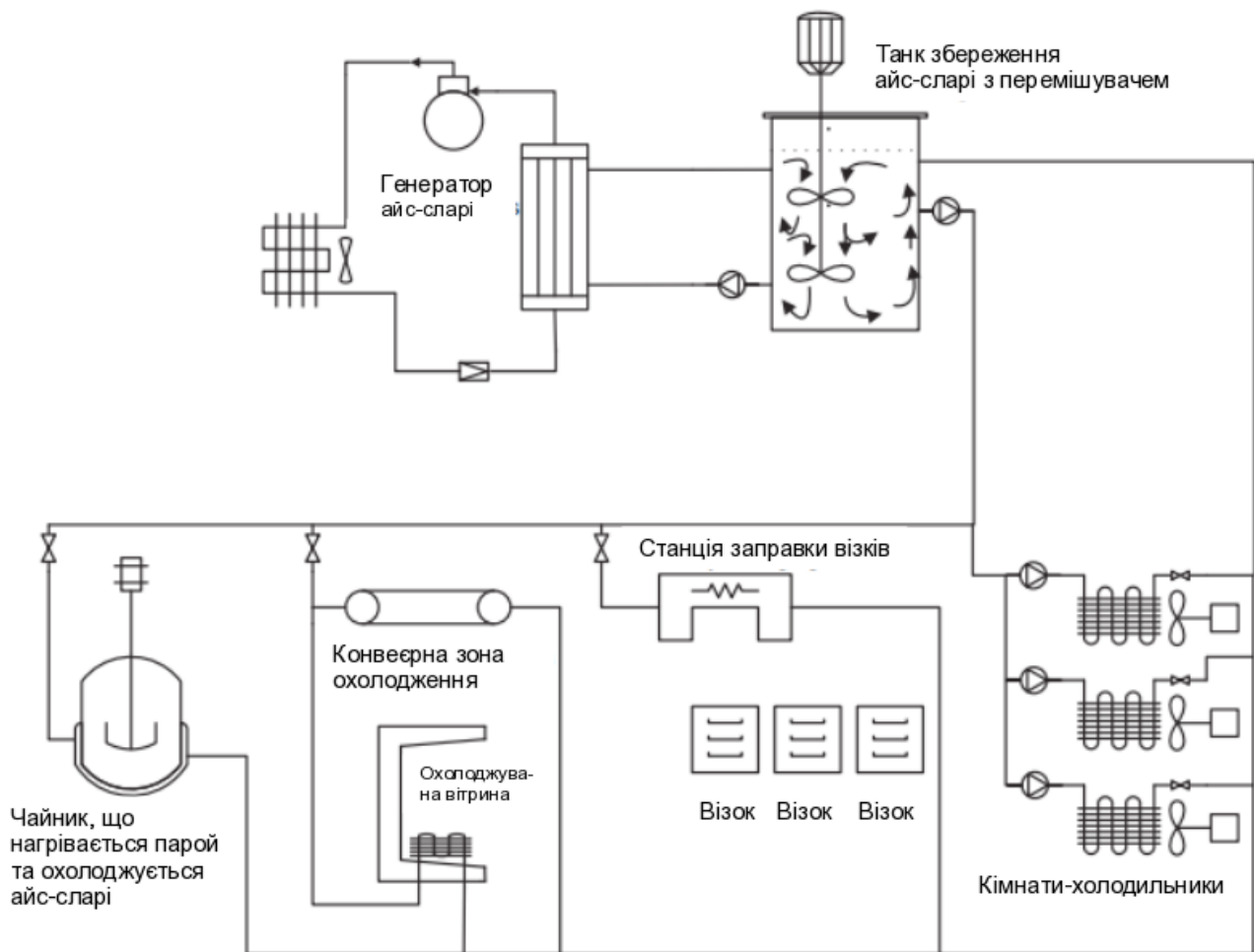


Рис. 5.13. Система підготовки їжі з використанням рідкого льоду

Їжу, яку потрібно подавати холодною, поміщають на звичайні порцелянові тарілки; їжа, яка повинна бути повторно нагріта, подається на порцелянових пластинах з металевим покриттям на дні і пластиковою кришкою з внутрішнім

вкладишем з нержавіючої сталі. Лотки розміщуються в ізольованих візках з нержавіючої сталі з двома колонками по 10 лотків.

Контейнери з подвійною стінкою заряджаються автоматично менш ніж за 4 хвилини на станції зарядки рідким льодом. Візки для транспортування піддонів підтримують холодну подачу їжі до 12 годин. Для нагрівання їжі використовують котушки індукційного нагріву, що переміщуються між лотками і нагрівають їжу.

Їжа, поміщена на звичайний фарфор або на пластиковий лоток, залишається холодною. Система включає в себе повний ланцюг охолодження з використанням рідкого льоду. Оскільки контур рідкого льоду є самодостатнім, він не виробляє ніяких відходів, шкідливих для навколишнього середовища.

Питання до розділу 5

1. Чи залежить збереження холоду у танку від типу депресанту?
2. Як відбувається гомогенне збереження айс-сларі?
3. Як відбувається гомогенне збереження айс-сларі?
4. Перерахуйте переваги та недоліки гомогенного та гетерогенного збереження айс-сларі.
5. Перерахуйте особливості транспортування айс-сларі в каналах.
6. Перерахуйте переваги та недоліки використання айс-сларі за результатами розрахунків циркуляції айс-сларі та розчину CaCl_2 .
7. Опишіть флюїдизаційну систему заморожування продуктів.
8. Які фізичні процеси використовує повітряна система отримання рідкого льоду?
9. Опишіть вакуумну систему вироблення рідкого льоду. Які ежектори використовує система?
10. Опишіть систему підготовки їжі з використанням рідкого льоду.

6. СУЧАСНЕ ПРОЕКТУВАННЯ

6.1. Інжиніринг інфраструктури та технічних систем

Розглядаються основні поняття і особливості інжинірингової діяльності [30].

- **Інженер** - навчений творець рукотворних об'єктів.
- **Інжиніринг** - діяльність з надання оплачуваних послуг, щодо створення та забезпечення функціонування штучних об'єктів.
- **Інжиніринговий проект** - відокремлений комплекс робіт по створенню і застосуванню об'єкта.
- **Моделі розподілу відповідальності учасників будівельних проектів** - типові варіанти зон відповідальності в проектах (для замовника, підрядника, інженера).
- **Типові послуги інжинірингових компаній** - консалтинг, проектування, комплектація, будівництво, управління проектами.
- **Бізнес-процеси інжинірингових компаній** - процеси неподання виконуваних компаніями робіт.

6.2. Що таке інжиніринг і хто такий інженер

З історії інжинірингу

Інжиніринг як сектор ринкової економіки виник півтора століття тому в Великобританії, коли вперше стали продаватися послуги інженерів (спочатку одинаків, а потім і груп інженерів, об'єднаних в інженерні фірми), затребувані промисловцями при будівництві нових заводів і модернізації діючих.

Активного розвитку інжиніринг набув після Другої світової війни. Тоді стали здійснюватися великі проекти відновлення і модернізації промисловості в Європі, а пізніше почалася масштабна індустріалізація країн третього світу. У зв'язку з цим виникла нова на той час потреба в комплексних інженерних послугах і проектах «під ключ». Зокрема, було потрібно не тільки побудувати промисловий об'єкт, але і допомогти замовнику в навчанні кадрів і надати

подальше технічне сприяння в освоєнні переданих технологій. У зв'язку з цим послуги в галузі інжинірингу стали все більш різноманітними, виникли національні та міжнародні ринки інжинірингових послуг.

З урахуванням нової практики знадобилося уточнити поняття інжинірингу, систематизувати його види, а також уніфікувати інжинірингові послуги не тільки на національному, а й на міжнародному рівні. Така робота значною мірою була виконана в 1970 - 1980 роки. Саме тоді склалося розуміння основних сучасних форм міжнародної діяльності в сфері надання інженерних послуг. Європейська економічна комісія ООН розробила, наприклад, Керівництво по складанню міжнародних договорів інжинірингу, Керівництво по складанню міжнародних договорів консорціуму та ін.

Керівництва і регламенти в галузі інжинірингу розроблялися також національними асоціаціями інженерів, зокрема американською і англійською. Великий обсяг робіт по уніфікації та стандартизації діяльності в галузі інжинірингу був виконаний під егідою Світового банку і Європейського банку реконструкції та розвитку, що дозволило сформулювати єдиний підхід до обґрунтування інвестицій і прийняття інвестиційних рішень на базі інженерних розробок, врахування екологічних і соціальних факторів.

Між наукою і виробництвом

Оксфордський словник трактує інжиніринг як діяльність по застосуванню наукових знань для цілей проектування, будівництва, управління машинами і установками. Інакше кажучи, інжиніринг - це перш за все діяльність по створенню і експлуатації об'єктів, заснована на наукових знаннях (рис. 6.1). Але в Оксфордському словнику є визначення інжинірингу як предмета прикладної галузевої науки. У цьому випадку виділяються механічний інжиніринг та інші види інжинірингу по галузях промисловості. У більш широкому розумінні поняття «інжиніринг» переноситься навіть у такі галузі, як генетика, фінанси, соціальна сфера (генна інженерія, фінансовий і соціальний інжиніринг).

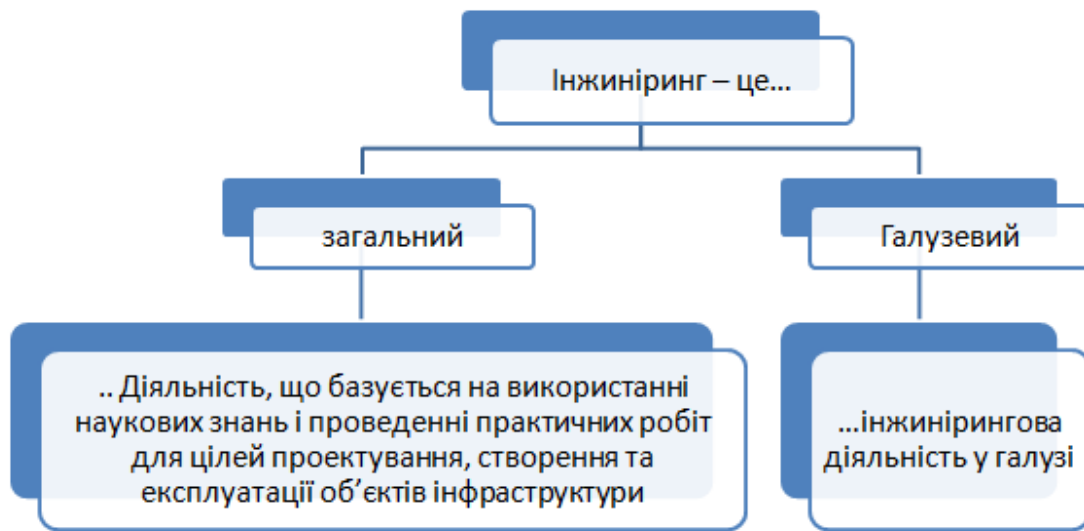


Рис. 6.1. Типологія інжинірингу

За визначенням Європейської економічної комісії ООН, інжиніринг - це особлива діяльність, пов'язана зі створенням і експлуатацією підприємств і об'єктів інфраструктури, або інакше кажучи – це сукупність проектних і практичних робіт і послуг, що відносяться до інженерно-технічної галузі та що необхідні для будівництва об'єкта і сприяння його експлуатації.

Таким чином, згідно з цим визначенням інжиніринг перебуває між наукою і самим виробництвом, формуючи техніко-технологічну базу для виробничої діяльності (рис. 6.2).

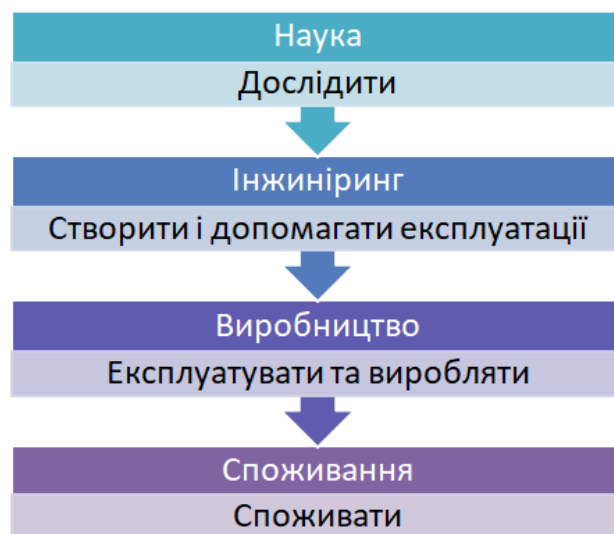


Рис. 6.2. Позиціонування інжинірингу між наукою і виробництвом

Інжиніринг в інвестиційній сфері

У сформованій практиці інжиніринг в інвестиційній сфері - це, перш за все, надання послуг інженерів в інтересах інвестиційного замовника (або його представника - технічного замовника), а так само і підрядника. Інвестиційний замовник використовує послуги інженерних компаній, залучаючи їх на умовах підряду для розробки техніко-економічних обґрунтувань проектів (ТЕО), інженерних вишукувань, підготовки проектної документації, авторського нагляду за роботою підрядника.

Часто більшість з зазначених вище видів робіт бере на себе підрядник, і тоді вже він привертає інженерні компанії для виконання вишукувальних та проектних робіт.

Крім того, підрядник сам потребує специфічних інжинірингових послуг для забезпечення його підрядної діяльності, зокрема, в розробці мережових графіків будівельно-монтажних робіт, розрахунків потреб в будівельній техніці і механізмах, оптимізації режимів їх роботи, проектування тимчасових будівельних селищ, автоматизації та комп'ютеризації та т. д.

Інженерна діяльність за кордоном здійснюється спеціалізованими інженерними, інженерно-консультаційними та інженерно-дослідними фірмами.

6.3. Зіставлення практик інжинірингу

Починаючи з 1970-х років, відзначається ряд нових тенденцій у розвитку інженерної діяльності, що виявляються в інтеграції інжинірингу з будівельним виробництвом і постачаннями матеріально-технічних ресурсів. Дана тенденція привела до виникнення проектно-будівельних (інженерно-будівельних) фірм.

Інша тенденція виявилася в інтеграції інжинірингу з процесами фінансування і управління проектами. Це привело до розвитку фірм, які здійснюють управління проектами «під ключ» з повним комплексом не тільки інжинірингових послуг, а й організації фінансування, управління поставками матеріально-технічних ресурсів та виконання будівельно-монтажних робіт, а також пуску збудованого об'єкта в експлуатацію. Такі фірми можуть не мати

своїх будівельних потужностей, вони керують роботою залучених проектувальників, будівельників і постачальників.

- **Інжиніринг "під ключ"** - системна інтеграція послуг від структурування проекту і організації фінансування до створення і експлуатації об'єкта.

- **Інжиніринговий підряд** - надання оплачуваних замовником інжинірингових послуг.

- **Інжиніринг «під готову продукцію»** - організація інвестування і створення об'єкта під фінансове забезпечення і майбутній грошовий потік, що генерується проектованим об'єктом.

При реалізації проектів на умовах «під ключ» інжинірингова компанія, як правило, діє в рамках консорціуму і створює тимчасове спільне підприємство - **SPV (single purpose venture)** для управління проектом з іншими виконавцями проекту (кредиторами, підрядниками, постачальниками). Існує практика, коли інжинірингова компанія в рамках такого консорціуму не здійснює загальне керівництво проектом, а виконує традиційний обмежений обсяг робіт за моделлю консультаційного або будівельного інжинірингу.

Набуває поширення метод реалізації проектів на умовах «під готову продукцію», «під реалізацію готової продукції», а також на умовах «будівництво - реалізація - передача» (**Build - Own - Transfer**).

Звернути увагу!
• Інжиніринг формує наукові, технологічні та управлінські основи розробки і реалізації інвестиційних проектів. • Інжиніринг - основний інструмент формування регіональної і глобальної інфраструктури сучасної економіки. • Форми надання інжинірингових послуг активно розвиваються. Розширюється практика системної інтеграції інжинірингових послуг. • Залежно від ситуації інжинірингова компанія може виконувати роль інженера-консультанта, інженера-підрядника, інженера-керівника. • Виконання інжинірингових послуг вимагає ефективного

управління бізнес-процесами та бізнес-проектами.

- Прагнучи ефективно надавати послуги «зовні», слід бути системно організованим «всередині».

Інженер

«Інженер – це учений-будівельник споруд різного роду». Приблизно так визначав словник В. І. Даля сенс інженерної діяльності.

Сучасне розуміння терміна «інжиніринг» багато в чому збереглося. При створенні об'єкта інженер виконує роль «вченого-будівельника», або допомагає будівельникові, або керує ним. Інженер знає, що будувати, як будувати і як управляти будівництвом (рис. 6.3).



Рис. 6.3. Хто такий інженер

При більш широкому трактуванні як об'єкт інжинірингу можуть виступати не тільки об'єкти будівництва, а й інші види штучно створюваних об'єктів. Тоді інжиніринг - це діяльність на комерційній основі для забезпечення функціонування штучно створюваних об'єктів і транспортних та інформаційних систем, систем управління, бізнес-систем і т. ін. Часто подібна діяльність здійснюється у формі відокремленого проекту вироблення інжинірингового рішення або у формі сервісних послуг.

Для природних систем і систем, які створюються людиною, етапи системного аналізу визначаються прийнятою моделлю життєвого циклу системи [28]. На сьогодні найбільш широко застосовуються дві моделі життєвого циклу.

- Каскадна модель життєвого циклу.
- Спіральна модель життєвого циклу, яка набуває все більшого поширення в останні роки.

Каскадна модель життєвого циклу посідала домінантне положення при аналізі й проектуванні систем приблизно до 1985 року. Вона розглядала етапи існування та розвитку систем як ізольовані і майже повністю завершені. Існування системи розпочинається початковими етапами зародження, потім етапами розвитку і відмирання. Система переходять з одного етапу в інший після повного завершення попереднього етапу. Така модель приймається у практичній діяльності людини, наприклад, при розробці певних технічних систем, організації нових виробництв, створенні підприємств, розробці програмного забезпечення. Основними етапами розвитку системи при каскадній моделі життєвого є такі:

- зародження;
- розвиток;
- старіння;
- відмирання.

Для систем, що розробляються і створюються людиною, етапи життєвого циклу дещо змінені. Основними етапами каскадної моделі є такі (рис.6.4):

- аналіз - вивчення того, що і для чого повинна робити система;
- проектування – визначення, як система повинна працювати: розробка плану вирішення проблеми, визначення підсистем їх взаємодії;
- реалізація - конкретні дії, направлені на розробку системи для вирішення проблеми;
- впровадження – введення системи в дію;
- супровід функціонування – практична діяльність системи та її аналіз.

Спіральна модель життєвого циклу також має ряд послідовних етапів, а саме:

- визначення вимог;
- аналіз;
- проектування;
- реалізація та тестування;
- інтеграція.

На цих етапах виконуються операції, як і при каскадній моделі. Етап реалізації здійснюється шляхом створення прототипів, на яких конкретизуються вимоги й деталі наступного циклу.



Рис. 6.4. Життєвий цикл об'єкта

Перехід від індустріального укладу до постіндустріального, який розвивається на даному етапі, змінив життєвий цикл об'єкта (рис. 6.5)

Життєвий цикл виробництва продукту

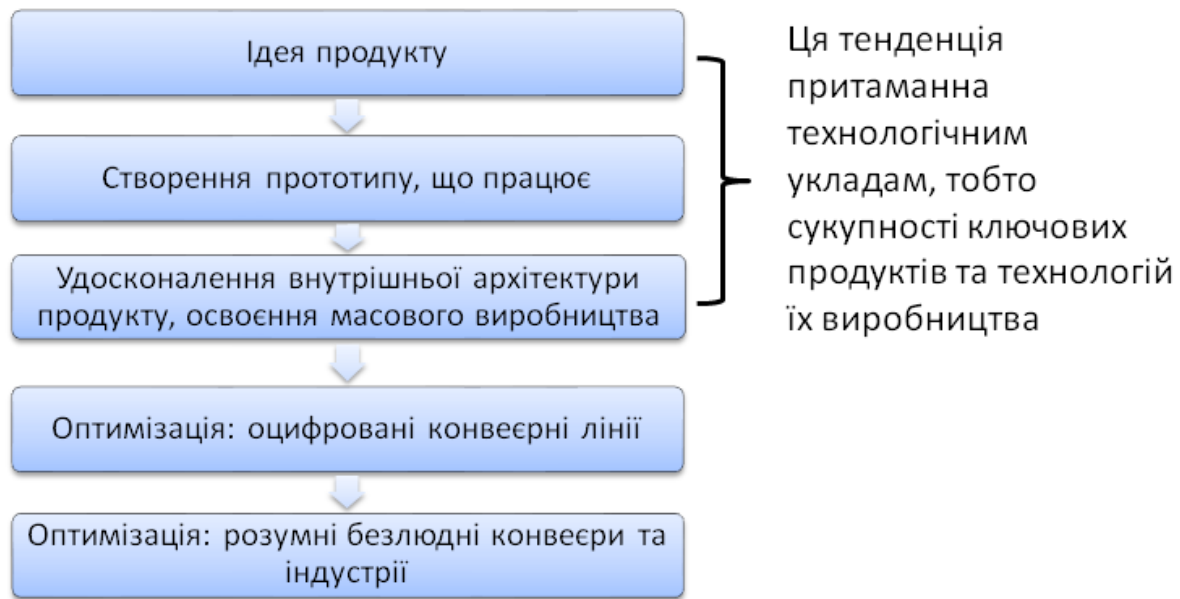


Рис. 6.5. Життєвий цикл об'єкта за новим технологічним укладом

Для нового технологічного укладу характерно:

1. Видалення людини з процесу прийняття виробничих рішень.
2. Перенесення центру ваги з виробництва в сферу проектування виробництва.
3. Фокус нового укладу - технології з виробництва та модифікації цілого спектра продуктів і послуг.
4. Людина фокусується на описі функціональності у вигляді, зручному для передачі в безлюдний технологічний цикл.
5. Скорочується роль «масових» продуктів і послуг. Кожному споживачеві - унікальний продукт або послуга. Приклад: перехід до персоналізованої медицини на основі розшифровки генома людини.
6. Центр прибутковості переноситься з «фізичного» рівня виробництва на «інтелектуальний».

6.4. Системна інженерія

Системно-інженерне мислення - це мислення, що потребує використання системного підходу в інженерії [31].

Коротке визначення: системна інженерія - це міждисциплінарний підхід і способи втілення успішної системи [32]. У цьому визначенні можна підкреслити таке:

- «Успішні системи» - це системи, якими займається системна інженерія. Слово «успішні» тут вкрай важливе і означає, що система повинна задовольнити потреби замовників, користувачів та інших стейкхолдерів (стейкхолдери - це ті, кого зачіпає система, або ті, хто зачіпає систему). Успіх - це коли системою всі задоволені.

- Слово «системи» використовується в дуже спеціальному значенні: це «системи» з системного підходу.

- «Міждисциплінарний підхід» означає, що системна інженерія претендує на те, що вона працює з усіма іншими інженерними спеціальностями (втім не тільки інженерними). «Підхід» зазвичай означає якісь напрацювання в одній предметній області, які можна перенести на інші предметні області.

- Слово «втілення» (realization, «переклад в реальність») означає буквально створення матеріальної (з речовини і полів) успішної системи.

Системна інженерія - це інженерія з системним мисленням в голові (а не будь-яка інженерія, що займається об'єктами, урочисто поійменованими системами просто для «додавання складності і науковості»).

Інше визначення включає ще одну фразу: «Вона фокусується на цілісному і одночасному/паралельному розумінні потреб стейкхолдерів; дослідженні можливостей; документуванні вимог; синтезуванні, перевірці, прийманні та поступовій появі інженерних рішень, в той час як на увагу береться повна проблема, від дослідження концепції системи до виведення системи з експлуатації». Тут потрібно підкреслити:

- Цілісність (повнота охоплення всіх частин цільової системи узгодженим їх цілим), міждисциплінарність (повнота охоплення всіх дисциплін) - це ключове, що відрізняє системну інженерію від всіх інших інженерних дисциплін.

- Паралельність виконання самих різних практик.
- Багато особливостей (розрізнення потреб користувачів і вимог, перевірки і приймання, наголос на синтез на противагу «аналітичним» дисциплін і т.ін.).
- Відповідальність за цілісність і міждисциплінарність.

Системна інженерія якраз і є тією дисципліною, яка відповідальна за забезпечення цілісності в інженерному проекті.

Це головна ознака, що відрізняє системних інженерів від всіх інших інженерів: вони відповідають за проект в цілому, відразу у всіх його деталях - як в частині деталей-частин, так і в частині використання детальних знань окремих дисциплін. Вони відповідальні за те, щоб не було пропущено якоїсь дрібнички, що веде до провалу.

Системна інженерія вирішує завдання подолання інженерної складності. Щоб отримати цільову систему, потрібна спеціальна дисципліна, щоб збирати результати діяльності самих різних інженерів в одне працездатне ціле.

Системна інженерія робить неможливе можливим: перш за все це відноситься до того, що надскладні системи працюють так, як задумано. Системні інженери найбільше працюють на етапах, коли самої системи ще немає, і їх завдання подати правильний проект, в якому різні частини системи і різні властивості, якими займаються різні інженерні дисципліни, впливають один на одного так, щоб не було несподіванок від цих впливів. Системний інженер відповідальний за те, щоб ризику невдачі, пов'язаного з поганою конструкцією, не було. Системний інженер відповідальний за те, щоб неможливо складні системи за неможливо короткий час створювалися і працювали так, як від них очікується.

Хто відповідальний за правильність проекту, правильність обраного рішення, дотримання всіх найскладніших практик, що дають на виході "правильно з першого разу"? Системні інженери: саме вони повинні придумати такі технічні рішення, щоб не було неприємних (втім і приємних теж) несподіванок при виготовленні, експлуатації та подальшому виведенні з експлуатації систем, що створюються у всіх цих складних проектах. І ці

системні інженери справляються - щороку надскладні проекти минулих років стають просто складними, а складні проекти - типовими.

Створювати такі складні системи можуть тільки великі багатодисциплінарні колективи, які вимагають якоїсь міждисциплінарної організації в поділі розумової праці. Саме питання утримання міждисциплінарної цілісності і організації міждисциплінарних робіт і вирішує системна інженерія. Вона:

- Утримує цілісність всього інженерного рішення для різних пропозицій людей (стейкхолдерів) до інженерного проекту.
- Використовує практики системної інженерії для створення успішного інженерного рішення.

6.5. Системний аналіз

При дослідженні сучасної економіки необхідні цілісні, комплексні та всебічні підходи, що акцентують увагу не тільки на певному економічному об'єкті, а й на дослідженні навколишнього середовища, в якому він функціонує. Одним з таких методів є системний підхід, що розглядає економіку як складну цілісну систему в різних аспектах.

Початок теорії систем покладено у працях О. О. Богданова, російського вченого-медика, філософа, і Людвіга фон Берталанфі, австрійського біолога-теоретика. Подальший розвиток теорія систем набула в працях М. Месаровича, І. Такахарі, Р. Директора, Р. Рорера та ін.

«Системний аналіз» - це методи вирішення проблем, що виникають у складних системах, розробка і класифікація методів аналізу систем та вирішення проблеми. «Системний підхід» - це поняття, яке полягає у тому, що до вирішення будь-якої проблеми треба підходити системно, тобто розглядати в цілому систему, в якій виникла ця проблема з урахуванням цілей і функцій системи, її структури, усіх зовнішніх та внутрішніх зв'язків.

У науковій літературі й у практиці все частіше вживаються поняття "система", "системність", "системний підхід", "системний аналіз", "загальна

теорія систем" і т. ін. Багато чого з того, що ще вчора називалося цілісним, комплексним, єдиним, комбінованим й іншим загальним і спеціальним термінами, сьогодні називається "системним".

Головне науково-методичне значення системного підходу полягає в тому, що він дозволяє сучасним дослідникам виявити й усвідомити принцип системності, що виявляється практично у всіх явищах і процесах у природі й суспільстві й окремо взятій людині.

Системний підхід базується на цілісному баченні досліджуваних об'єктів, явищ і процесів і є найбільш універсальним й адекватним методом аналізу й дослідження будь-яких складних технічних, економічних, соціальних, екологічних, політичних, біологічних та інших систем. **Системний підхід являє собою** сукупність методів і засобів, що дозволяють досліджувати властивості, структуру й функції об'єктів, явищ або процесів у цілому, подавати їх як системи з усіма складними міжелементними взаємозв'язками, взаємовпливом елементів на систему й на навколишнє середовище, а також впливом самої системи на її структурні елементи.

Головною особливістю системного підходу є наявність домінуючої ролі цілого над часткою, складного над простим.

Сучасні аналітичні підходи до аспекту управління, які відносяться до стратегічного планування, найчастіше називають **системним аналізом**.

В оперативному управлінні ці ідеї також використовуються, але називаються **управлінням проектами** (або по-іншому: управлінням системами, управлінням програмою або управлінням виробництвом залежно від галузі робіт).

Важлива особливість системного аналізу відзначається при характеристиці цього напрямку: «Системний аналіз дає основу для сполучення знань і досвіду фахівців багатьох галузей при знаходженні рішень, труднощі яких не можуть бути переборені на основі суджень будь-якого окремого експерта».

Системний аналіз - наука, що займається проблемою ухвалення рішення в умовах аналізу великої кількості інформації різної природи.

З цього визначення випливає, що метою застосування системного аналізу до конкретної проблеми є підвищення ступеня обґрунтованості прийнятого рішення, розширення безлічі варіантів, серед яких робиться вибір, з одночасним зазначенням способів відкидання.

Фундаментальним поняттям системного аналізу є термін «система». На сьогоднішній день не існує загальноприйнятого визначення цього поняття.

Системи оточують нас усюди: кожен предмет, явище, процес - це система. Наприклад, системами є живі організми, технічні прилади, фірми, корпорації, організації, банки, установи, галузі економіки.

Розглянемо основні поняття, які використовуються при дослідженні систем.

Елемент - деякий об'єкт (матеріальний, енергетичний, інформаційний), що володіє низкою важливих для нас властивостей, але внутрішня будова (зміст) якого безвідносна до мети розгляду.

Зв'язок - важливий для цілей розгляду обмін між елементами речовиною, енергією, інформацією.

Система - сукупність елементів, яка має такі ознаки:

- зв'язки, які дозволяють за допомогою переходів по них від елемента до елемента з'єднати два будь-яких елементи сукупності;
- властивість, яка відмінна від властивостей окремих елементів сукупності.

Практично будь-який об'єкт з певної точки зору може бути розглянутий як система. Питання полягає в тому, наскільки доцільна така точка зору.

Підсистема - сукупність елементів, які об'єднані єдиним процесом функціонування і при взаємодії реалізують певну операцію, що необхідна для досягнення поставленої перед системою мети.

Надсистема - більш широка система, в яку входить і досліджувана система як складова частина.

Всі системи функціонують у певному зовнішньому середовищі.

Зовнішнє середовище - це все те, що перебуває поза системою, включаючи необхідні умови для існування й розвитку системи. Зовнішнє

середовище складається з ряду природних, соціальних, інформаційних, економічних і виробничих факторів, які впливають на систему й самі є під впливом системи.

Взаємодія між системою й навколишнім середовищем відбувається за допомогою входів і виходів.

Вхід системи - це вплив на неї зовнішнього середовища.

Вихід системи - результат функціонування системи для досягнення певної мети або її реакція на вплив зовнішнього середовища. Загальна кількість взаємодій системи з навколишнім середовищем велика, тому обмежуються аналізом найбільш важливих.

Мета системи - це бажаний стан її виходів. Системи, що мають мету - цілеспрямовані. Будь-які соціально-економічні системи цілеспрямовані, тому що їхніми елементами є люди.

Принципи системного підходу - це положення загального характеру, що є узагальненням досвіду роботи людини зі складними системами. Їх часто вважають ядром методології. Відомо близько двох десятків таких принципів, ряд з яких доцільно розглянути:

- принцип кінцевої мети: абсолютний пріоритет кінцевої мети;
- принцип єдності: спільний розгляд системи як цілого і як сукупності елементів;
- принцип зв'язності: розгляд будь-якої частини разом з її зв'язками з оточенням;
- принцип модульної побудови: корисне виділення модулів у системі й розгляд її як сукупності модулів;
- принцип ієрархії: корисне введення ієрархії елементів й (або) їхнє ранжирування;
- принцип функціональності: спільний розгляд структури й функції із пріоритетом функції над структурою;

- принцип розвитку: облік змінюваності системи, її здатності до розвитку, розширення, заміни частин, нагромадження інформації;
- принцип децентралізації: сполучення у прийнятих рішеннях і управління централізацією й децентралізацією;
- принцип невизначеності: врахування невизначеностей і випадків у системі.

6.6. Agile

Визначення

Agile (agile software development, від англ. agile - моторний) - це сімейство «гнучких» підходів до розробки програмного забезпечення. Такі підходи також іноді називають фреймворками або agile-методологіями [33].

Agile виник в ІТ-середовищі, але потім поширився і в інші сфери - від промислової інженерії до штучного інтелекту.

Зміст Agile сформульований в Agile-маніфесті розробки ПО: «Люди і взаємодія важливіші за процеси та інструменти. Працюючий продукт важливіший за вичерпну документацію. Співпраця з замовником важливіша за узгодження умов контракту. Готовність до змін важливіша за проходження попереднім планом».

Agile-маніфест - головний документ всіх «гнучких» підходів до розробки. Він був створений в 2001 році групою ентузіастів-програмістів, які хотіли зрозуміти, що саме лежить в основі розробки затребуваного і корисного ІТ-продукту.

Agile передбачає, що при реалізації проекту не потрібно спиратися тільки на заздалегідь створені докладні плани. Важливо орієнтуватися на постійно мінливі умови зовнішнього і внутрішнього середовища і враховувати зворотний зв'язок від замовників і користувачів. Це заохочує розробників та інженерів експериментувати і шукати нові рішення, не обмежуючи себе жорсткими рамками і стандартами.

До окремих agile-підходів відносяться scrum і kanban.

Scrum - це «підхід структури». Над кожним проектом працює універсальна команда фахівців, до якої приєднуються ще двоє людей: власник продукту і scrum-майстер. Перший з'єднує команду з замовником і стежить за розвитком проекту; це не формальний керівник команди, а скоріше куратор. Другий допомагає першому організувати бізнес-процес: проводить загальні збори, вирішує побутові проблеми, мотивує команду і стежить за дотриманням scrum-підходу.

Scrum-підхід поділяє робочий процес на рівні спринти - зазвичай це періоди від тижня до місяця, залежно від проекту і команди. Перед спринтом формулюються задачі на даний спринт, а як він закінчиться, обговорюються результати, і команда починає новий спринт. Спринти дуже зручно порівнювати між собою, що дозволяє управляти ефективністю роботи.

Kanban - це «підхід балансу». Його завдання - збалансувати різних фахівців всередині команди і уникнути ситуації, коли дизайнери працюють цілодобово, а розробники скаржаться на відсутність нових завдань.

Вся команда єдина - в kanban немає ролей власника продукту і scrum-майстра. Бізнес-процес поділяється не на універсальні спринти, а на стадії виконання конкретних завдань: «Планується», «Розробляється», «Тестується», «Завершено» і ін.

Головний показник ефективності в kanban - це середній час проходження завдання по дошці. Завдання пройшло швидко - команда працювала продуктивно і злагоджено. Завдання затягнулося - треба думати, на якому етапі і чому виникли затримки та чию роботу треба оптимізувати.

Для візуалізації agile-підходів використовують дошки: фізичні та електронні. Вони дозволяють зробити робочий процес відкритим і зрозумілим для всіх фахівців, що важливо, коли у команди немає одного формального керівника.

Agile - це філософія, scrum - структура, waterfall - метод, kanban - система управління. Scrum і kanban - варіанти Agile, але у них є деякі явні відмінності. Методика scrum вимагає фіксованих ролей, тоді як у kanban немає необхідних

ролей. Scrum заснована на ітераціях, які об'єднують планування, оптимізацію процесів і випуск. У kanban це можна робити регулярно або кожен раз, коли вам потрібно. Команда scrum вимагає оцінки своєї роботи, тоді як команді kanban це не потрібно.

Що таке Agile і як він з'явився

Agile - це спосіб мислення зі своєю системою цінностей. Він схожий на філософію, релігію або культуру - такий же набір установок, в які людина вірить і які впливають на його поведінку [34].

Раніше продукти робили відразу цілком. Для цього йшли по ланцюжку: ідея → технічне завдання → дизайн → програмування → тестування → реліз. Якщо на етапі тестування з'являлася нова ідея, доводилося ігнорувати її або переробляти всі попередні етапи. Це було незручно - продукти або виходили гірше, ніж могли б, або вибивалися з термінів і бюджетів.

Прогресивні розробники стали пробувати нові підходи. Так з'явилися Скрам, Канбан і ще з десятків способів. Команди могли тестувати і міняти продукти в процесі роботи - за це такі підходи називали гнучкими. Експерименти виявилися вдалим: клієнти не обманювалися в очікуваннях, розробники вкладалися в терміни і бюджети, а розміри компаній не впливали на продуктивність команд.

Щоб знайти формулу розробки продуктів, в 2001 році 17 практиків сучасних підходів зібралися в гірському селі Сноубёрд. Вони обговорили свої способи управління і зробили відкриття: підходи у всіх різні, але ідеї збігаються. Ці ідеї заклали в основу Agile, записали в Agile-маніфесті і доповнили Принципами Agile.

У чому суть філософії Agile

І Agile-маніфест, і принципи Agile написані загальними фразами, тому їх важко зрозуміти. Оцініть самі: «люди і взаємодії важливіші за процесиви та інструментиви», «найкращі вимоги, архітектурні та технічні рішення

народжуються у самоорганізованих команд» або «постійна увага до технічної досконалості і якості проектування підвищує гнучкість проекту».

Щоб стало зрозуміло, порівняємо, як відрізняються склади команд, процес роботи і результат з Agileспособом мислення і без нього [34]. Припустимо, дві умовні пекарні хочуть налагодити виробництво і продаж нової випічки.

Традиційна пекарня Рецептом займаються шеф і технолог. Думка кондитерів і продавців враховуватися не буде: першим дадуть готову інструкцію для роботи, другим - нову випічку. Шеф і технолог звітуватимуть перед власником пекарні. А він - хвалити або лаяти за невдачі.	Agileпекарня Для створення рецепта залучать всіх, хто буде працювати з новою випічкою: кондитерів, продавців з роздрібних магазинів, фахівців відділу закупівлі продуктів, власника пекарні, технолога і шефа. І обов'язково - покупців. У Команді немає начальників і ієрархії. Рішення приймають професіонали, які разом відповідають за успіх чи невдачу.
--	---

У Agile-команді немає начальників і ієрархії.

Процес роботи теж відрізняється. Суворий розподіл функцій в традиційній пекарні і спільні експерименти команди.

Традиційна пекарня Власник пише лист шефу про те, що треба випустити нову випічку, і більше не втручається в роботу. Шеф вибирає, яке тістечко буде випускати пекарня, технолог розробляє рецепт і документацію.	Agile-пекарня Власник пекарні розповідає, чому хоче нове тістечко і яка собівартість буде вигідна. Продавці уточнюють, яку випічку просять покупці. Закупівельники пропонують продукти, на які зараз низькі ціни. Пошук ідеального рецепта
---	--

Іноді шеф і технолог разом експериментують над рецептом, але рідко залучають кондитерів з виробництва. Кожен працює тільки над своїм шматочком роботи.	заснований на експерименті. Команда придумує рецепт, пече пробну партію і отримує відгуки на дегустації. І так кілька разів, поки не вийде.
--	---

Agile - це робота разом з клієнтом, експерименти і готовність змінити початковий план.

Результати пекарень будуть різними. Непередбачуваний у одних і гарантовано гарний у інших.

Традиційна пекарня Весь виробничий ланцюжок складеться тільки наприкінці процесу, тому що можуть виникнути проблеми на будь-якому етапі: із закупівлею необхідних товарів, підготовкою тіста, випічкою та обсягом продажів. Результат непередбачуваний, на перевірку гіпотез йде багато ресурсів.	Agileпекарня Команда почала з самого простого рецепту і встигла кілька разів його змінити, спираючись на відгуки. Новим тістечком задоволені покупці і власник пекарні. Процес випічки оптимізований, всі проблеми налагоджені на етапі експериментів.
--	---

Agile - це швидкий випуск працюючого Продукту, який подобається клієнтам і замовникам.

Щоб організувати роботу в дусі Agile, пекарня з нашого прикладу використовувала в роботі ідеї Agile-маніфесту:

- люди і взаємодії важливіші за процеси та інструменти,
- працюючий продукт важливіший за вичерпну документацію,
- співпраця з замовником важливіша за узгодження умов контракту,
- готовність до змін важливіша за проходження попереднім планом.

Спосіб мислення Agile допомагає компаніям ставати успішними. Але в питаннях ідеології будь-які крайнощі шкідливі - невірно думати, що Agile заперечує регламент, документацію і планування. Все це є, але відіграє набагато меншу роль, ніж жива взаємодія людей і гнучкість в роботі.

Що дає Agile

Agile змінює спосіб мислення, тому співробітники пробують нові ролі і по-іншому організують роботу в компанії (рис. 6.6) [34]. Agile приносить свободу від формальностей корпорації, бажання професійно розвиватися, почуття команди і комфортний ритм роботи.

Свобода від диктату папірців і начальників. Професіонали можуть більше часу присвячувати цікавим завданням і розвитку свого потенціалу і менше - підготовці формальних звітів і безглузdim мітингам заради регламенту.

Відключення рядових співробітників від матриці. Вони перестають бути гвинтиками, від яких нічого не залежить, і вже не чекають кінця робочого дня, щоб вийти з офісу і почати жити. Навпаки, співробітники замислюються про професійний розвиток, робота стає важливою і цікавою.

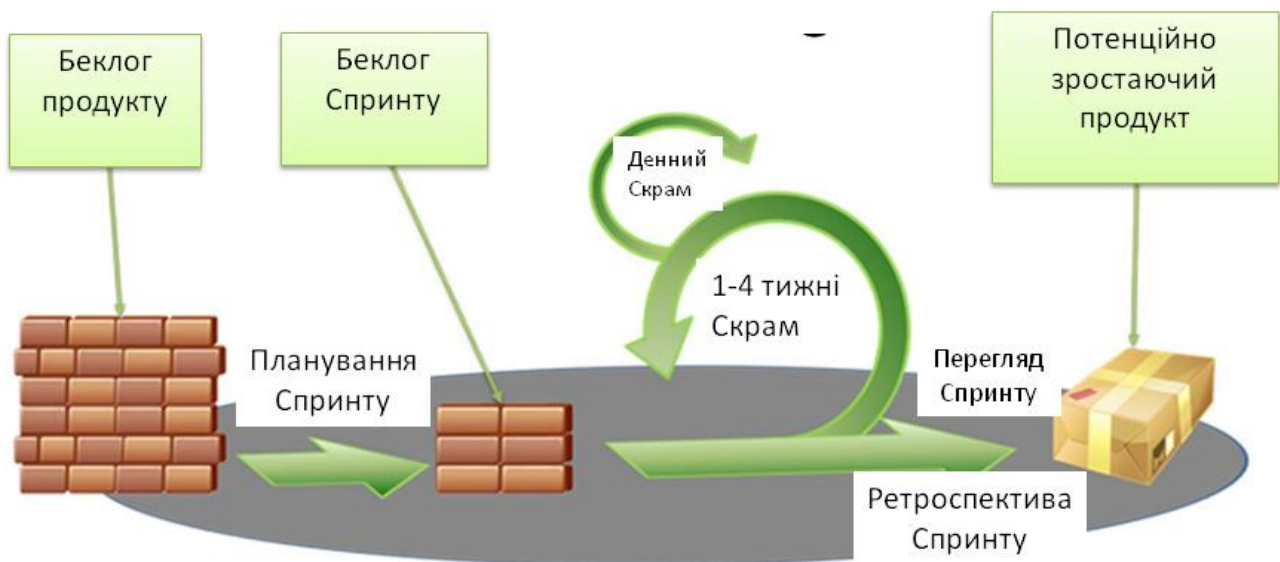


Рис. 6.6. Що таке Agile

(<https://infostart.ru/upload/iblock/190/1908d3cb70177f0ba3649e606056d7cb.jpg>)

Багато розмов. Всередині колективу складаються справжні команди, де один за всіх і всі за одного. Такі мушкетери діляться проблемами і в потрібний

момент приходять товаришеві на допомогу заради успіху спільної справи.

Комфортний ритм роботи і обсяг навантаження. Команда повинна бути в змозі працювати нескінченно довго. Agile забороняє аврари і пропагує комфортний ритм, в якому цікаво працювати і справлятися з новими викликами.

Agile допомагає бути щасливішим: бачити в роботі справу життя і отримувати від неї задоволення

6.7. Основоположні принципи Agile-маніфесту

Agile дотримується таких принципів [35]:

1. Найвищим пріоритетом для нас є задоволення потреб замовника, завдяки регулярному і ранньому постачанню коштовного програмного забезпечення.
2. Зміна вимог вітається, навіть на пізніх стадіях розробки.
3. Agile-процеси дозволяють використовувати зміни для забезпечення замовнику конкурентної переваги.
4. Працюючий продукт слід випускати якомога частіше, з періодичністю від кількох тижнів до кількох місяців.
5. Протягом всього проекту розробники і представники бізнесу повинні щодня працювати разом.
6. Над проектом повинні працювати мотивовані професіонали. Щоб робота була зроблена, створіть умови, забезпечте підтримку і повністю довіртеся їм.
7. Безпосереднє спілкування є найбільш практичним і ефективним способом обміну інформацією як з самою командою, так і всередині команди.
8. Працюючий продукт - основний показник прогресу.
9. Інвестори, розробники і користувачі повинні мати можливість підтримувати постійний ритм нескінченно. Agile допомагає налагодити такий стійкий процес розробки.
10. Постійна увага до технічної досконалості і якості проектування

підвищує гнучкість проекту.

11. Простота - мистецтво мінімізації зайвого клопоту - вкрай необхідна.

12. Найкращі вимоги, архітектурні та технічні рішення народжуються у самоорганізованих команд.

13. Команда повинна систематично аналізувати можливі способи поліпшення ефективності і відповідно коригувати стиль своєї роботи.

6.8. Agile: як і коли застосовувати цей метод

Існує класичний підхід до створення продуктів та сервісів. Цей підхід називається каскадним, або ітеративною методологією розробки. В англійській термінології такий підхід називають waterfall development (від англ. - водоспад). При такій схемі розробки, одного разу затвердивши план продукту, ви не зможете цей план зупинити або змінити до його створення [36].

Agile - підхід інноваційного переосмислення створення нового продукту або послуги. В його основі лежить дуже проста ідея: кожен учасник процесу, кожен співробітник цього «конвеєрного складання» повинен залучатися до процесу переосмислення своїх завдань і спільної справи. Кожен може зупинити конвеєр і внести свої раціональні пропозиції.

У більшості організацій при створенні продуктів люди, відповідальні за ті чи інші етапи проекту, знаходяться в самих різних, часто конфліктуючих між собою, підрозділах. І якщо продукт не працює і не приносить бізнесу прибуток, то кожен норовить звинуватити іншого. Хоча насправді в таких випадках винні, як правило, всі.

Метод Agile передбачає залучення всіх учасників процесу розробки продукту, залишаючи учасникам звичні компетенції. Подібний підхід дозволяє зрозуміти, що всі вони працюють заради тієї самої ж кінцевої мети - якісного продукту для своїх клієнтів.

Так відбувається зміна бізнес-культури самого підприємства. І з точки зору ефективності та виведення на ринок нових ідей, це ідеальна організаційна структура.

Безумовно, є організації, яким Agile зовсім не потрібен. Наприклад, державні відомства. Їх діяльність ґрунтується на законодавстві. Ми не зможемо взаємодіяти з державою, якщо правила гри змінюються щодня.

Таким чином, ми маємо дві радикальні протилежності організаційної інфраструктури. З одного боку - найсуворіша бюрократична заформалізована організація, яка застосовується в тих чи інших випадках і добре працює в певних ситуаціях. І повна діаметральна протилежність їй - молоді стартапи, команди односторонців, які дійсно створюють щось нове, і Agile знаходиться набагато ближче до стану емоційного колективу, який працює на кінцеву мету, працездатний якісний продукт. І тому проблеми, що виникають на будь-якому етапі, - це проблеми всіх людей, і всі, хто здатний їх вирішити, залучаються до цього процесу.

Передовий бізнес базується на трьох китах: досвіді і знаннях в індустрії (в якій працює бізнес); розробці продуктів та сервісів за методологією Agile і найголовніше - інноваційній культурі.

Знати Agile в обличчя

Agile-методики легко впізнати за ключовими характеристиками [37]:

- Мінімізація ризиків - це головна мета в рамках будь-якого гнучкого підходу.
- Ітеративна розробка - робота в коротких циклах.
- Люди і комунікація - найважливіше.

Якщо розглядати Agile з двох берегів річки - замовника і команди, - такий підхід має сенс для всіх.

- Замовнику потрібно вчасно отримувати хоча б мінімально працездатний продукт, змінювати умови, при цьому не залишаючись без продукту.
- Команді на руку спілкування з замовником та колегами. Прозорість процесів, що зменшує шанси на несподіванки, швидке вирішення проблем. Ну і багато хто розуміє, куди дівається час і де робота стопориться.

- Плюс якісно поліпшується комунікація всередині команди. Всі фокусуються на загальній ідеї, секретів один від одного немає, кожен бере на себе обіцянку (соціальні зобов'язання - куди без них).

Agile приводить від хаосу до порядку. Проводилися дослідження: з'ясувалося, що проекти, де робота велася в рамках гнучкого підходу, в 3 рази успішніші, ніж ті, де процеси збудовані в стандартній парадигмі. І це виглядає цілком логічно: замовник отримує те, що хоче, і з мінімальними витратами часу і ресурсів.

При чому тут Скрам і Канбан

Ми з'ясували, що Agile - це філософія зі своєю системою цінностей. Вони звучать заманливо, але використовувати їх в житті складно. Не кожна команда зможе завтра працювати без начальника. Незрозуміло, що робити без докладного технічного завдання. Не всякий клієнт погодиться їздити в офіс розробників або телефонувати по кілька разів на день. І неясно, з чого почати Agile.

Щоб застосувати філософію на практиці, використовують фреймворки: Скрам, Канбан і інші [33].

Фреймворк - це набір готових правил, які пояснюють, як організувати роботу за Agile. Вони бувають різного ступеня конкретності. Наприклад, в Канбані шість загальних правил, а в Скрамі описані ролі, події і артефакти. Їх можна розширювати і адаптувати, головне, дотримуватися цінностей Agile.

Може бути Agile без фреймворків. Так працюють майже всі стартапи і деякі підрозділи в корпораціях.

6.9. Гнучке планування

Agile стає не просто методологією створення нового, а системою гнучкого планування розвитку всієї компанії [36]. Повинна бути побудована така інфраструктура, яка так само гнучко реагує на запити, що надходять від клієнтів, і вимоги, що змінюються в процесі розробки продукту і його експлуатації (під цим, до речі, розуміють тотальний перехід до хмарних

технологій).

Для гнучкого планування необхідно розуміти і аналізувати кожен бізнес-процес. А це вже наступний етап розвитку компанії - її дигіталізація.

Для сучасного цифрового підприємства мають бути передбачені три компоненти: методологія гнучкої розробки (agile development); гнучка підлаштована під неї інфраструктура (agile infrastructure); аналітика великих даних.

Яким же чином класичним підприємствам впровадити філософію Agile? Що потрібно зробити, щоб розрізнені відділи великої компанії перетворити в команду однодумців, як в стартапі?

Лідерство і відповідальність - ось єдина відповідь. Керівник повинен в першу чергу сам привносити щось нове в компанію кожен день, і це прагнення до інновацій стане основою корпоративної культури організації. Інноваційна культура закладається в принципах формування команди менеджерів, темах дискусій, які відбуваються на всіх нарадах, постановці стратегічних завдань, місії та бачення компанії. І без цього ніяк.

6.10. Як влаштовані процеси Scrum

Scrum - це сьогодні найпопулярніша гнучка методика, яку запропонував Джефф Сазерленд, автор книги «Scrum», для вилучення недоліків класичного управління проектами (рис. 6.7).

1. Виберіть власника продукту - людину, яка бачить, до якої мети ви йдете і що хочете отримати в результаті.

2. Визначтеся з командою - від 3 до 10 осіб, які володіють навичками, що дозволяють отримати результат (тобто працездатний продукт).

3. Виберіть скрам-майстра – людину, яка стежить за ходом проекту і допомагає команді боротися з труднощами.

4. Складіть беклог продукту - зберіть в одному місці (бажано на Agile-дошці) всі вимоги до продукту і розставте пріоритети. Власник продукту повинен продумати і зібрати всі побажання. Потім команда повинна оцінити беклог, щоб зрозуміти, чи можливо все це зробити і скільки часу буде потрібно.

5. Заплануйте спринти - відрізки часу (тиждень або два), за які команда виконує певний набір завдань. Спринти будуть регулярними: наприклад, 15 разів по два тижні, поки вийде готовий продукт.

6. Проводьте щоденні зустрічі на 15 хвилин (і ні хвилиною більше) - на порядку три питання, на які коротко відповідає кожен: що робив вчора, що буде робити сьогодні і які перепони заважають «взяти висоту».

7. Робіть огляди - за підсумками спринту команда розповідає, що вдалося зробити, і демонструє працездатні частини продукту. На огляди може прийти хто завгодно: власник продукту, головний замовник або навіть потенційні клієнти.

8. Проводьте ретроспективу - після кожного спринту Agile-команда обговорює проблеми і шукає рішення. Повинен вийти план змін, який команда відразу ж і запровадить - на наступному спринті.

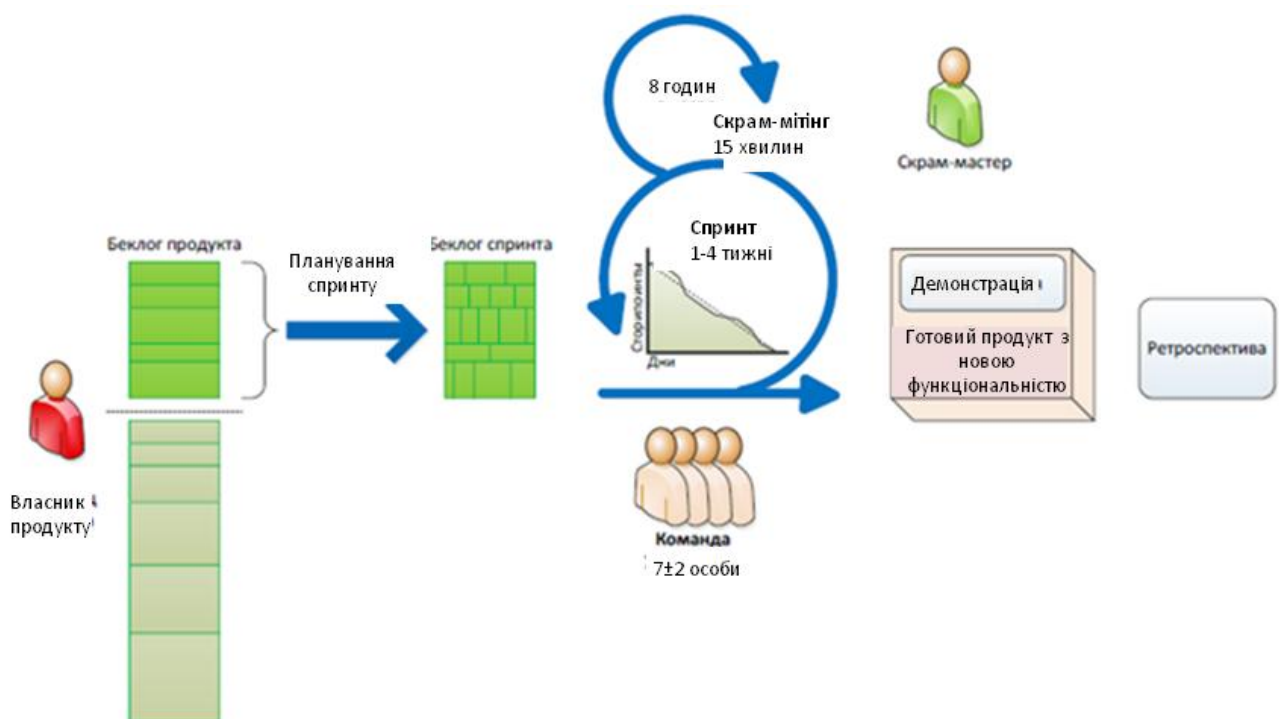


Рис. 6.7. Процеси Скраму (<https://berichnow.ru/wp-content/uploads/2015/12/scrum-meeting.png>)

Scrum - це більше, ніж метод командної роботи. Scrum прискорює темп всіх починань людини. Неважливо, в чому суть проекту або проблеми, - методика Scrum може бути використана в будь-якому починанні, щоб

підвищити продуктивність і домогтися кращих результатів.

6.11. Канбан

А як же канбан, який не можна назвати традиційним? Девід Андерсон, засновник навчальних закладів Lean Kanban University і David J Anderson School of Management і автор книги «Канбан», пропонує такий погляд [38].

Канбан-метод являє собою комплексну адаптивну систему, яка спрямована на каталізацію переходу організації до бережливого виробництва. Деяка кількість канбан-жетонів (або карток), що дорівнює ємності системи, запускається в обіг. Одна картка відповідає одному елементу роботи. Кожна картка - це сигнальний механізм. Новий елемент роботи може початися, тільки якщо для нього доступна картка. Ця доступна картка прикріплюється до елемента роботи на час його проходження через всю систему (рис. 6.8).

Канбан дає інструменти для відстеження ходу проекту,

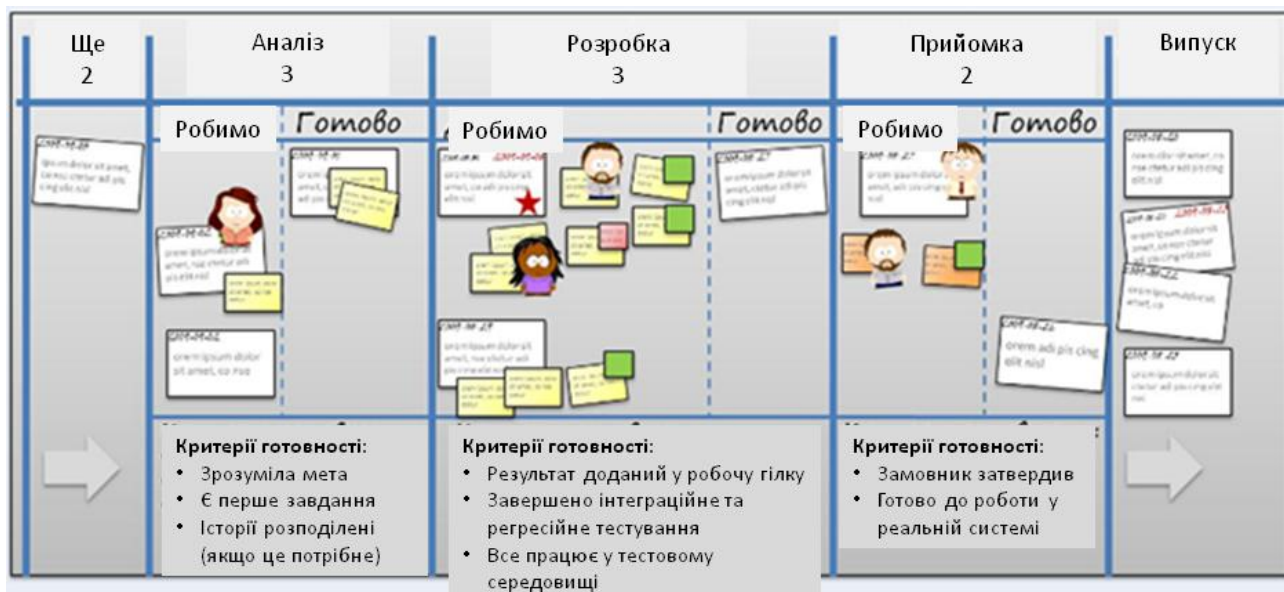


Рис. 6.8 Використання канбану. (<https://s.dou.ua/storage-files/kanban-trello1.png>)

Коли карток більше не залишається, нову роботу починати не можна. Будь-яка нова робота повинна залишатися в черзі, поки картка не визволиться. Коли якась кількість роботи закінчена, картка звільняється і знову запускається в обіг. Тепер можна починати роботу над новим елементом в черзі.

Цей механізм відомий як витягальна система, оскільки нова робота

втягується системою, коли вона володіє достатньою ємністю для цього, а не заштовхується в неї на вимогу. Витягаюча система не може виявитися перевантаженою, якщо ємність, яка визначається кількістю карток, що знаходяться в обігу, розрахована.

Канбан-система придатна для того, щоб довести число незавершених завдань команди до заданої ємності і досягти балансу між навантаженням на команду і її пропускною спроможністю.

Яку методологію роботи вибирати - вирішувати вам самим. Однозначної відповіді немає. Беручи рішення, враховувати варто все, навіть фактори, що здаються дрібними і неважливими: тип продукту; людей, які працюють в команді; цілі та плани компанії; терміни за проектом і характеристики замовника.

Робота повинна бути видимою - це один з головних принципів Agile. Прозорість всіх дій і процесів забезпечує швидке досягнення мети. Найбільш поширений спосіб домогтися цього - завести скрам-дошку з колонками: «Потрібно зробити, або беклог»; «В роботі»; «Зроблено». Стікери - це призначені для користувача вимоги, які потрібно реалізувати; у міру того як вони виконуються, команда переміщує стікери з однієї колонки в іншу.

А ось ще один спосіб зробити роботу видимою - створити графік згоряння робіт, що дозволяє відстежувати і прогнозувати хід проекту. Він базується на двох факторах: часі і обсязі робіт.

Складання графіка - процес нескладний. Спочатку ми креслимо систему координат і на осі x вказуємо кількість спринтів. На осі y ми пишемо очки за призначену для користувача історію (або іншу, більш звичну вам одиницю виміру зусиль). Перша точка на графіку - це приблизний обсяг робіт на весь беклог продукту ще до розробки. Для наступної точки потрібно визначити решту обсягу робіт з беклога продукту в кінці першого спринту. Після цього ми проводимо лінію між цими точками. Вона називається згорянням і показує швидкість, з якою розробляється функціонал з беклога продукту.

Якщо ми продовжимо лінію виконання до осі x , то зможемо передбачити,

коли приблизно проект буде закінчений (за умови, що швидкість роботи і зусилля залишаться стабільними). Графік, або діаграма згоряння робіт, - це невід'ємний інструмент відстеження і прогнозування ходу проекту в Scrum.

Постійність змін

Проривні технології з часом з'являються в будь-якій галузі. Незрозуміло тільки, наскільки швидко і часто це трапляється. Компанії, нездатні до стрімкої адаптації, зійдуть з дистанції, навіть якщо в даний момент з їх доходами все в порядку.

На щастя, емпірична природа Scrum відмінно пристосувала цю методологію до впровадження різних нововведень і інновацій, дій в складних ситуаціях, де переважають плинність і непередбачуваність. Якщо ваш бізнес характеризується змінами, в Scrum ви, швидше за все, знайдете потужного союзника.

Agile-методи, в тому числі Scrum, дотримуються старої як світ істини: постійні тільки зміни.

6.12. Проектне мислення

«Ми знаходимося у критичній точці, де швидка зміна змушує нас шукати не тільки нові способи вирішення проблем, але нові проблеми для вирішення.» - Тім Браун (президент і генеральний директор IDEO)

Творчий підхід, командна робота, орієнтація на людей, цікавість і оптимізм - головні складові дизайн-мислення, методології, часто використовуваної для пошуку нових рішень існуючих проблем.

Таким чином, дизайн-мислення - це процес, завжди орієнтований на створення кращого майбутнього і пошук нових рішень для комплексних проблем у різноманітних галузях.

Головною особливістю дизайн-мислення є не критичний аналіз, а творчий процес, у якому часом самі несподівані ідеї ведуть до кращого вирішення проблеми.

За версією Герберта Саймона, в дизайн-мисленні можна виділити 7 етапів [39]:

- 1) визначення проблеми;
- 2) дослідження;
- 3) формування ідей;
- 4) створення прототипів;
- 5) вибір кращого рішення;
- 6) впровадження рішення;
- 7) оцінка результатів.

У процесі проходження цих етапів формуються проблеми, задаються правильні питання, обмірковуються ідеї і вибираються кращі рішення. При цьому дані етапи не є лінійними - різні етапи можна проходити одночасно і повертатися до певних етапів при необхідності.

Визначення проблеми - це найперший і найважливіший етап дизайн-мислення, оскільки якщо ви невірно визначте, в чому проблема, то і рішення, до якого ви прийдете у процесі, буде рішенням не тієї проблеми, яку потрібно вирішити.

Після того як ви визначили проблему, вам потрібно також визначити, хто є кінцевим користувачем і якого результату ви хочете досягти (що є успішним результатом проекту?).

На цьому етапі важлива емпатія, спрямована на формування питань для отримання інформації про об'єкт, визначення існуючих перешкод [40].

Дослідження. Другий етап у дизайн-мисленні починається з огляду історії проблеми: чи стикався хтось з цією проблемою до вас? Як цю проблему намагалися вирішити раніше? Чи були рішення успішними, чи ні? Чому?

Огляд історії допоможе вам уникнути таких помилок, які вже були припущені до вас.

На цьому етапі важливою є взаємодія з вашими кінцевими користувачами - ви можете поговорити з ними і почути їхню думку щодо проблеми та ідеї про те, як цю проблему можна вирішити (ці ідеї знадобляться вам надалі). Можна

провести фокус-групи або опитування; іноді найбільш ефективним способом дізнатися щось про проблему стане спостереження - може виявитися, що в реальності ваші користувачі ведуть себе не зовсім так, як вони розповіли вам.

Необхідно з'ясувати, чому в даний час існує проблема, а також визначити діяльність, у якій електронне навчання, матеріали, інструменти можуть бути частиною рішення.

Формування ідей. На цьому етапі ви повинні зібрати всю наявну у вас інформацію і зрозуміти потреби ваших користувачів. Потім починається найцікавіший процес - процес мозкового штурму.

Головне завдання мозкового штурму - придумати якомога більше самих різних ідей, що вирішують проблему.

Створення прототипів. Прототип - це модель подання кількох ідей для обговорення.

Тепер, коли ви придумали все, що змогли придумати, можна починати працювати з цими ідеями - вибирати кращі, об'єднувати їх, покращувати і т. ін.

Необхідно створити декілька чернеток вашого продукту або рішення і показати його різним людям - на цьому етапі важливо отримати зворотний зв'язок. Використовуйте зворотний зв'язок для того, щоб вносити відповідні зміни до вашого продукту, а потім вже приступайте до створення його працюючих прототипів.

Вибір кращого рішення. На цьому етапі необхідно вибрати найкраще рішення для впровадження. Уважно перегляньте ваші цілі і запропоновані ідеї, при цьому емоції або авторство ідей не повинні впливати на ваш вибір. Пам'ятайте про те, що саме практичне і очевидне рішення не завжди найкраще.

Впровадження рішення. Після схвалення прототипу в об'єкт вносяться необхідні зміни, визначаються ресурси і, при необхідності, проводяться випробування, залежно від обставин.

Оцінка результатів. Створення та впровадження продукту - це ще не останній етап у процесі дизайн-мислення. Дуже важливо оцінити те, що у вас вийшло, і, якщо потрібно, доопрацювати або змінити продукт.

Отримайте зворотний зв'язок від користувачів - задайте їм питання і подивіться на те, як вони використовують ваш продукт. Чи відповідає це тому, чого ви хотіли досягти? Дізнайтеся у користувачів, що можна поліпшити, і внесіть потрібні зміни.

Дуже важливо виділити і вивчити допущені помилки для поліпшення проектування курсу і проектного мислення.

За допомогою дизайн-мислення і творчого підходу можна отримати не тільки хороший результат, але й результат, який набагато перевершує початкові очікування. Тому методологія дизайн-мислення є популярною сьогодні в багатьох сферах діяльності.

Питання до розділу 6.

1. Що таке інжиніринг? Дайте типологію.
2. Опишіть практики інжинірингу.
3. Дайте характеристику сучасного інженера.
4. Що таке життєвий цикл об'єкта? Які існують моделі циклу?
5. Дайте характеристику моделей життєвого циклу об'єкта.
6. Що характерно для сучасного технологічного укладу?
7. Що таке системна інженерія?
8. Які задачі розв'язує системна інженерія?
9. Що таке системний аналіз? Його роль у проектуванні об'єктів.
10. Опишіть особливості системного підходу.
11. Що таке Agile? Опишіть складові Agile.
12. Поясніть чому Agile - це філософія, scrum - структура, kanban - система управління.
13. У чому суть філософії Agile?
14. Перерахуйте переваги та недоліки Agile.
15. Як влаштовані процеси Scrum?
16. Як працює Канбан?
17. Що таке проектне мислення і як воно працює?

ВИСНОВКИ

Рідкий лід (айс-сларі) – один з найбільш ефективних низькотемпературних теплоносіїв завдяки наявності фазових перетворень у потоці. Тверда фаза у розчині з різноманітними депресантами забезпечує фазові перетворення у широкому температурному діапазоні, а невеликі розміри кристалів суттєво не збільшують гідравлічні втрати тиску.

Широке коло теоретичних та експериментальних досліджень дозволяє вибрати залежності для розрахунку теплофізичних властивостей: коефіцієнтів теплопровідності, теплоємності, тепловіддачі, в'язкості та густини.

Наведені у посібнику приклади розрахунків показують можливість удвічі збільшити ефективність використання айс-сларі у вторинних контурах. У таких контурах втричі зменшуються масові витрати холодоносія; гідравлічні втрати в системі зменшуються в 1,3 - 2 рази при збільшенні коефіцієнтів тепловіддачі в 2,7 рази.

Розглянуто різні типи генераторів для отримання айс-сларі, і серед них найбільш поширений генератор з флюїдизованим шаром, для якого наведена детальна конструкція та надійна методика проектування.

Новий тип теплоносія вже набуває поширення у світі, є приклади систем для заморожування риби, дрібних фруктів у флюїдизованому шарі, оснащення промислових кухонь системою охолодження з використанням рідкого льоду.

На сучасному етапі змінюється діяльність інженера, проектування нових об'єктів вимагає навичок роботи у великих колективах, нових ефективних методів проектування. Все це має бути враховано при проектуванні нових систем з використанням рідкого льоду.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Kuriyama T. Ice Slurry transportation and cold distribution system / T.Kuriyama, Y. Sawahata Information // Booklet for the Technical Tour of the Fourth Workshop of IIR Ice Slurry Working Party. – 2001. - P. 1–6.
2. Melinder A. Accurate thermophysical property values of water solutions are important for ice slurry modelling and calculations / A. Melinder. // Proceedings of the Third Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration, Horw/Lucerne, Switzerland, 16–18 May 2001. - P. 11–18.
3. Egolf, P.W. From Physical Properties of Ice Slurries to Industrial Ice Slurry Applications / Egolf, P.W., Kauffeld, // International Journal of Refrigeration - 2005, Vol. 28(1), pp. 4–12.
4. Hagg Cecilia. Ice slurry as secondary fluid in refrigeration systems – Stockholm, 2005 [Електронний ресурс] / Cecilia Hagg. - Режим доступу : <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:13910/fulltext01.pdf>.
5. Pronk P. Fluidized bed for ice slurry production / Pronk P., Meewisse J.W., Celigueta Azurmendi I., Olea L.L. , Avram D.T., Infante Ferreira C.A., third progress report – 2003
6. Meewisse J. Fluidized bed ice slurry generator for enhanced secondary cooling systems / Meewisse J. – 2004, 240 p.
7. Meewisse J. Freezing point depression of various ice slurries – Germany, - 2001 [Електронний ресурс] / Meewisse J. Infante Ferreira C.A. - Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/237564003_freezing_point_depression_of_various_ice_slurries
8. Frei B. Viscometry applied to the Bingham substance ice slurry. / B. Frei Egolf P.W. // Proceedings of the Second Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration, Paris, France; 25–26 May 2000. p. 48–60

9. Pronk P., Fluidized bed for ice slurry production / Pronk P., Meewisse J., Infante Ferreira C.A. // final report – 2004
10. Van der Gun M.A. Ice production in a fluidised bed crystalliser / Van der Gun M.A., Meewisse J.W. and Infante Ferreira C.A. – Osaka (Japan), 2001
11. Pronk. P, Fluidized bed for ice slurry production, / Pronk. P., Meewisse J.W, Celigueta Azurmendi I., Olea L.L., Avram D.T., Infante Ferreira C.A.. // first progress report – 2002
12. Pronk P. Fluidized bed for ice slurry production / Pronk P., Celigueta Azurmendi I., Meewisse J. W. and Infante Ferreira C. A. // second progress report – 2002
13. Pronk P. Effects of long-term ice slurry storage on crystal size distribution / Pronk P., Infante Ferreira C.A., Witkamp G.J. – Stockholm (Sweden), 2002
14. Pronk P., Time-dependent behavior of different ice slurries during storage / Pronk P., Hansenb T.M., Infante Ferreiraa C.A., Witkamp G.J. // International Journal of Refrigeration, - 2005, Vol. 28, Issue 1, P. 27-36 [Электронный ресурс] - Режим доступа : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700704001392>.
15. Thermal energy storage. Design guide 2011 [Электронный ресурс] - Режим доступа : http://www.pcmproducts.net/files/design_manual.pdf, 43 p.
16. Pronk P. Ice slurry production with a circulating fluidized bed heat exchanger / Pronk P., Meewisse J.W, Infante Ferreira C.A., Witkamp G.J. // International Congress of Refrigeration – 2003, Washington.
17. Pronk P. Circulating fluidized bed heat exchanger for Ice Slurry Production [Электронный ресурс] / Pronk P. - Режим доступа : https://www.researchgate.net/publication/228397386_Circulating_fluidized_bed_heat_exchanger_for_ice_slurry_production
18. Богданов С. Н. Холодильная техника. Свойства веществ / С. Н. Богданов. – М. : Агропромиздат, 1985.

19. Баскаков А. П. Расчеты аппаратов кипящего слоя / А. П. Баскаков. – Л. : Химия, 1986.
20. Баскаков А. П. Процессы тепло- и массопереноса в кипящем слое / А. П. Баскаков, Б. В. Берг, А. Ф. Рыжков, Н. Ф. Филипповский. – М. : Metallurgy, 1978.
21. Григорьев В. А. Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники / В. А. Григорьев, Ю. И. Крохин. – М. : Энергоиздат, 1982.
22. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамические сопротивления: Справочное пособие / С. С. Кутателадзе – М. : Энергоатомиздат, 1990.
23. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко – Москва. : Энергия, 1975.
24. Алексеев В. П., Вайнштейн Г. Е., Герасимов П. В. Расчет и моделирование аппаратов криогенных установок / В. П. Алексеев, Г. Е. Вайнштейн, П. В. Герасимов. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1987.
25. Идельчик Н. К. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Н. К. Идельчик – М. : Госэнергоиздат, 1960.
26. Fikiin K. Handbook on Ice Slurries – 2005 [Электронный ресурс] / Fikiin K, Kauffeld M. - Режим доступа : https://www.researchgate.net/profile/Kostadin_Fikiin/publication/281870024_Direct_Contact_Chilling_and_Freezing_of_Foods_in_Ice_Slurries/links/55fc867b08aeba1d9f418a8a/Direct-Contact-Chilling-and-Freezing-of-Foods-in-Ice-Slurries.pdf
27. Chen Y., Zhang X. S., Yin Y. G. Feasibility Analysis of a Novel Ice Slurry Producing System / Y. Chen, X. S. Zhang, and Y. G. Yin // Applied Mechanics and Materials. - 2013, vol. 325-326, P. 1416-1421..
28. Tang Y., Liu Z., Liu P., Kang W. A novel ice slurry producing system with vacuum freezing / Y. Tang, Z. Liu, P. Liu, and W. Kang, // Journal of Central South University. - 2017, vol. 24, N. 3, P. 736-742.

29. Kauffeld M., Wang M. J., Goldstein V., Kasza K. E. Ice slurry applications / M. Kauffeld, M. J. Wang, V. Goldstein, K. E. Kasza // International Journal of Refrigeration. – 2010, vol. 33, N. 8, pp. 1491-1505.
30. Кондратьев В.В., Лоренц В.Я. Даєш інжиніринг! Методологія організації проектного бізнесу / В.В. Кондратьєв, В.Я. Лоренц. - 2-ге вид., пераб. і доп. / - М. : Ексмо, 2007.
31. А.Левенчук. Системноинженерное мышление [Электронный ресурс] / А. Левенчук - Режим доступа : http://techinvestlab.ru/files/systems_engineering_thinking/systems_engineering_thinking_2015.pdf.
32. Systems engineering is an interdisciplinary approach and means to enable the realization of successful systems [Электронный ресурс] - Режим доступа : http://sebokwiki.org/wiki/Systems_Engineering_%28glossary%29.
33. Зыкова С. Agile, scrum, kanban: в чем разница и для чего использовать? [Электронный ресурс] / Зыкова С. - Режим доступа: <https://rb.ru/story/agile-scrum-kanban/>
34. Мамаева Л. Аджайл: что это и зачем нужно. [Электронный ресурс] / Мамаева Л. - Режим доступа : <http://www.agilebasics.ru/chto-takoe-agile/>.
35. Основополагающие принципы Agile-манифеста [Электронный ресурс] - Режим доступа : <http://agilemanifesto.org/iso/ru/principles.html>.
36. Карпов С. Agile: как и когда применять этот метод. [Электронный ресурс] / Карпов С. - Режим доступа : <https://hbr-russia.ru/management/operatsionnoe-upravlenie/p17368/>
37. Лепилина А. Что такое Agile: Гайд по гибким методологиям или как работать с пользой. Часть 1. [Электронный ресурс] / Лепилина А. - Режим доступа : <https://biz.mann-ivanov-ferber.ru/2016/07/08/chto-takoe-agile-gajd-po-gibkim-metodologiyam-ili-kak-rabotat-s-polzozh-chast-1/>
38. Лепилина А. Что такое Agile: Гайд по гибким методологиям или как работать с пользой. Часть 3. [Электронный ресурс] / Лепилина А. - Режим

доступа : <https://biz.mann-ivanov-ferber.ru/2017/01/17/что-такое-agile-gajd-po-gibkim-metodologiyam-ili-kak-rabotat-s-polzoy-chast-3/>

39. Измestьева К. Що таке дизайн-мислення? 2015 [Електронний ресурс] / К. Измestьева. - Режим доступа : <http://te-st.ru/2015/01/28/what-is-design-thinking/>

40. Christopher Pappas. The Basics Of Design Thinking In eLearning [Електронний ресурс] / Christopher Pappas. - Режим доступа : <http://elearningindustry.com/basics-design-thinking-elearning>

ЗМІСТ

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	3
ВСТУП	5
1. ВИБІР АЙС-СЛАРИ	10
1.1. Загальна характеристика депресантів	11
1.2 Органічні депресанти	13
1.3 Неорганічні депресанти	13
1.4 Депресія точки замерзання	14
1.5 Масова концентрація льоду.	18
2 ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І ПРОЦЕСИ.	21
2.1 Густина	21
2.2 Ентальпія і теплоємність	22
2.3 Теплопровідність	23
2.4 В'язкість	24
2.5 Коефіцієнт тепловіддачі при ламінарній течії	27
2.6 Коефіцієнт тепловіддачі при турбулентній течії	29
2.7 Перекачування айс-сларри.	31
3 ЗРОСТАННЯ І АДГЕЗІЯ КРИСТАЛІВ ЛЬОДУ	33
3.1 Кристалізація льоду	33
3.2 Адгезія льоду	34
3.3 Удари частинок	37
3.4 Зростання кристалів	38
4 ГЕНЕРАТОР З ФЛЮЇДИЗОВАНИМ ШАРОМ	43
4.1 Конструкція генератору	43
4.2 Стаціонарна флюїдизація	45
4.3 Циркулюючий флюїдизований шар	50
4.4 Механізми теплопередачі в генераторі з флюїдизованим шаром	55
4.5 Математична модель генератора з флюїдизованим шаром	56

4.6 Аналіз методики проектування	60
4.7 Інші типи генераторів айс-сларі	62
5 ЗБЕРІГАННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ АЙС-СЛАРІ	70
5.1 Зберігання	70
5.2 Гомогенне і гетерогенне перемішування айс-сларі	71
5.3 Транспортування айс-сларі	73
5.4 Айс-сларі у вторинних системах охолодження	74
5.5 Системи з використанням рідкого льоду	83
6 СУЧАСНЕ ПРОЕКТУВАННЯ	90
6.1 Інжиніринг інфраструктури та технічних систем	90
6.2 Що таке інжиніринг і хто такий інженер	90
6.3 Зіставлення практик інжинірингу	93
6.4 Системна інженерія	98
6.5 Системний аналіз	101
6.6 Agile	105
6.7 Основоволожні принципи Agile-маніфесту	111
6.8 Agile: як і коли застосовувати цей метод	112
6.9 Гнучке планування	114
6.10 Як влаштовані процеси Scrum	115
6.11 Канбан	117
6.12 Проектне мислення	119
ВИСНОВКИ	123
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ	124

Навчальне видання

Кухаренко Володимир Миколайович

РІДКИЙ ЛІД ТА ХОЛОДИЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Навчально-методичний посібник

для студентів спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування»
вищих навчальних закладів

Роботу до видання рекомендував Ю. В. Ромашов

Редактор Л. Л. Яковлева

План 2018 р., поз.142

Підп. до друку 22.07.2019 р. формат 60x84 1/16. Папір офсетний.

Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. Др.. арк. 7,79.

Наклад 50 прим. Зам. № 519 ціна договірна

КП «Міська друкарня». 61002, Харків, вул.. Алчевських, 44

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5495 від 22.08.2017 р.

Шановні студенти, науковці, колеги та фахівці холодильної галузі!
Громадська Спілка «Холодильна асоціація України»
вітає Вас з першим виданням технічної літератури при підтримці
асоціації та щиро дякує колективу авторів і всіх причетних за довіру та обрання нас як
партнерів!

Наша асоціація створена наприкінці 2017 року та наразі об'єднує перш за все юридичних осіб, що працюють у галузі промислового, комерційного холоду та холодильних технологій! Нашими членами асоціації та їх підприємствами надаються робочі місця більш ніж 2500 тисячам працівників, сплачуються мільйонні податки до бюджету країни та її областей, ми працюємо як в межах країни, так і на експортні ринки послуг та постачання обладнання вітчизняного виробництва. Все про нас можна бачити тут: www.ref.org.ua

Ми відкриті до співпраці як з підприємствами, так і з малим бізнесом, навчальними закладами професійної фахової освіти, що викладають дисципліни з холодильних технологій!

Головною метою нашої Асоціації є *об'єднання у правовому та інформаційному полі компаній та підприємств, фізичних осіб діючих у галузі холодозабезпечення України, а також сприяння членам Спілки – виробникам, інжиніринговим та інсталяційним компаніям, продавцям, імпортерам та експортерам сучасного холодильного устаткування задля досягнення наступних цілей:*

- **розвиток холодильної галузі в Україні** та сприяння виведенню вітчизняних виробників та компаній на міжнародний ринок обладнання, технологій та послуг;
- **робота із законодавчими та державними органами влади України** з розробки та впровадження міжнародних (Монреальського, Кіотського протоколів та ін.) та українських законодавчих актів з питань їх виконання по речовинах, що руйнують озоновий шар та впливають на глобальні зміни клімату, імплементації європейських нормативних актів та стандартів щодо функціонування вітчизняної галузі холодозабезпечення та підготовки її до функціонування за європейськими стандартами якості з урахуванням пропозицій та безпеки членів Спілки;
- **представництво інтересів членів Спілки у відносинах з органами державної влади**, органами місцевого самоврядування, їх посадовими і службовими особами, сприяння якнайшвидшому впровадженню єдиних стандартів якості та застосуванню сучасного холодильного устаткування, модернізації нормативно-правових актів, які містять обов'язкові вимоги у промисловій, торговій, побутовій сферах.
- **захист та підтримка інтересів членів Спілки у питаннях співпраці з державними органами**, забезпечення безпечного та ефективного функціонування, здійснення підприємницької діяльності членами Спілки у конкурентному середовищі, вирішення та урегулювання спірних і конфліктних питань між членами Спілки;
- **системна робота із закладами професійної освіти** з питань її вдосконалення відповідно найкращих європейських стандартів та з питань спільної підготовки якісних кваліфікованих кадрів для галузі, їх сертифікації і підвищення кваліфікації;
- **участь членів Спілки у міжнародних освітніх, технологічних та інноваційних проектах**, які забезпечують досягнення цілей Спілки.

Надзвичайно корисно буде для нас усіх об'єднати зусилля у реалізації спільних проектів, що надасть змогу фінансувати асоціацією технічні видання, а також для реалізації досліджень та пілотних проектів, тощо...

Наші проекти тут: <http://ref.org.ua/projects/>

Інформація про навчальні заклади, що готують фахівців холодильної справи тут: <http://ref.org.ua/projects/stroi/>

База даних асоціації, яку ми можемо з Вами наповнити та підтримувати, маючи можливість для студентів, викладачів, фахівців користуватись безкоштовними програмами та статтями є тут: <http://ref.org.ua/info/articles/>

ЗАПРОШУЄМО ДО СПІВПРАЦІ ТА СПІЛЬНИХ ПРОЕКТІВ!!!
З повагою, Голова Правління ГС «Холодильна асоціація України»
Сергій Анашкін

Наш сайт: www.ref.org.ua

Сторінка у Фейсбуці: <https://www.facebook.com/gshau2018/> Єл. пошта: gshau2018@gmail.com

Телефон: +38(067)567-18-54, м. Київ, вул. Дружківська, 10, оф. 417