



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Національний університет водного господарства  
та природокористування**

**О.М. Бордюженко**

**ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ,  
ТЕПЛОТЕХНІКА ТА ТЕПЛОТЕХНІЧНЕ  
ОБЛАДНАННЯ**

**Частина 2**

**Процеси сушіння, випалу і плавлення.**

**Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону**

**Навчальний посібник**

**Європейська кредитно-трансферна система**

**Для студентів напрямку 6.060101 "Будівництво"**

**Рівне – 2010**



**УДК 536.24+666.9**

**ББК 31.3**

**Б82**

*Затверджено вченою радою Національного університету водного господарства та природокористування  
(Протокол № 10 від 25.09.2009 р.)*

**Рецензенти:**

*Саницький М.А.*, доктор технічних наук, професор Національного університету "Львівська політехніка";

*Волощук В.А.*, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики та машинознавства НУВГП.

**Бордюженко О.М.**

**Б82** Основи термодинаміки, теплотехніка та теплотехнічне обладнання: Ч.2. Процеси сушіння, випалу і плавлення. Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону. Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2010. – 230 с.

Навчальний посібник "Основи термодинаміки, теплотехніка та теплотехнічне обладнання" містить робочу програму, стисло викладений навчальний матеріал дисципліни, що поділений на змістові модулі і теми, питання та вправи для самоконтролю з кожної теми, методичні рекомендації до самостійної та індивідуальної роботи; типові завдання для модульних контрольних робіт, список рекомендованої літератури.

В другій частині посібника розглянуті сушарки та печі для штучних виробів, плавильні агрегати, а також процеси і апарати для теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів.

Навчальний посібник призначено для самостійного вивчення дисципліни в умовах кредитно-трансферної системи навчального процесу студентами вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом 6.060101 "Будівництво".

**УДК 536.24+666.9**

**ББК 31.3**

© Бордюженко О.М., 2010

© Національний університет водного господарства та природокористування, 2010



## ПЕРЕДМОВА

---

Дисципліна "Основи термодинаміки, теплотехніка та теплотехнічне обладнання" є однією з базових дисциплін, що формують інженерну підготовку спеціалістів багатьох технічних напрямків. Для технологів з виробництва будівельних матеріалів та виробів особливо важливою є, поряд з хімічною і інженерно-технологічною, також і теплотехнічна підготовка.

Термодинаміка і теплотехніка ґрунтуються на базових математично формалізованих законах. Термодинамічні і теплові процеси описані численними залежностями, емпіричними формулами, критеріальними рівняннями. Для засвоєння курсу студенти повинні розв'язувати задачі, пов'язані з різноманітними ситуаціями, що виникають в установках промислової теплотехніки і теплоенергетики. Локальні задачі формують необхідні базові навички до розрахунку теплових процесів і апаратів

В першій частині навчального комплексу розкриті питання, що стосуються двох перших модулів: *модуль 1* – теоретичні відомості з технічної термодинаміки і теплопередачі; *модуль 2* – горіння палива, теплові установки для сушіння і випалу. Даний посібник є продовженням комплексу (частина 2) і включає наступні 2 модулі: *модуль 3* – процеси сушіння, випалу та плавлення матеріалів; *модуль 4* – теплова обробка виробів з бетону і залізобетону.

Друга частина комплексу включає практикум з прикладами розв'язування локальних задач із розрахунку теплових агрегатів сушіння, випалу і теплової обробки бетонних і залізобетонних виробів а також лабораторний практикум з тепловологісної обробки бетону. Наведені тестові завдання для модульних контрольних робіт і завдання та рекомендації до виконання індивідуальної та самостійної роботи.

Автор вдячний рецензентам: доктору технічних наук, професору Саницькому М.А. та кандидату технічних наук, доценту Волощуку В.А. за цінні поради та рекомендації, висловлені при написанні другої частини комплексу.



# 1. ОПИС ТА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Робоча програма розроблена відповідно до "Варіативної частини освітньо-професійної програми підготовки бакалавра за напрямом підготовки "Будівництво". Робоча програма затверджена на засіданні кафедри ТБВіМ, протокол № 8 від 26.04.2007 р. та методичною комісією напряму "Будівництво", протокол № 6 від 7.05.2007 р.

## 1.1. Опис предмета навчальної дисципліни «Основи термодинаміки, теплотехніка та теплотехнічне обладнання»

Таблиця 1.1

Курс: підготовка бакалаврів	Напрямок, спеціальність, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни
Кількість кредитів, відповідних ECTS – 7,5 Модулів – 4 Змістових модулів - 7  Загальна кількість годин – 270 Тижневих: - аудиторних – 3,5 - СРС – 4,4	Напрямок: 6.092100 «Будівництво» Спеціальності: 6.092100:  – <i>Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів;</i>  Освітньо-кваліфікаційний рівень: <i>бакалавр</i>	Дисципліна – за вибором ВНЗ Рік підготовки – 3, 4. Семестри – 6, 7. Лекції – 60 год. Лабораторні заняття – 14 год. Практичні заняття – 46 год. Самостійна робота – 102 год. Індивідуальна робота (48 год.): КР №1 – 24 год.; КР №2 – 24 год.; Вид контролю: залік – 6 семестр; іспит – 7 семестр.

**Примітка.** Співвідношення кількості годин аудиторних занять та самостійної і індивідуальної роботи становить 1:1,25 або 44% до 56%.





## 1.2. Мета і завдання дисципліни

Забезпечуючими дисциплінами для даного курсу є математика, фізика, хімія, теоретична механіка, гідравліка.

В результаті вивчення дисципліни студент повинен знати:

- способи передачі тепла;
- основні закономірності і залежності передачі тепла теплопровідністю, конвекцією, випромінюванням;
- теплотехнічні параметри, різновиди і характеристики палива;
- види теплогенераторів, теплоносіїв, різновиди і типи промислових печей, сушарок та ін. апаратів обробки матеріалів;
- характеристики аеродинамічних трактів, тяго-дутьєвих пристроїв;
- методи аналізу та оцінювання теплової ефективності теплотехнічного обладнання.

Студент повинен вміти:

- виконувати розрахунки горіння палива;
- складати матеріально-теплові баланси теплотехнічного обладнання;
- розраховувати аеродинамічні тракти і підбирати тяго-дутьєве обладнання і пристрої аспірації;
- обчислювати параметри теплової установки, правильно призначати вид і підбирати тип обладнання конкретної теплотехнологічної операції.

## 1.3. Програма навчальної дисципліни

### МОДУЛЬ 1. Технічна термодинаміка. Теплопередача

#### Змістовий модуль 1:

**Тема 1.1.** Вступ до термодинаміки. Основні поняття, визначення. Параметри стану. Газові закони. Теплоємність. Змішування.

**Тема 1.2.** Перший закон термодинаміки. Теплота, робота. Ентальпія. Процеси підведення та відведення теплоти.

**Тема 1.3.** Другий закон термодинаміки. Ентропія. Кругові процеси. термодинаміка ідеальних газів. Реальні гази. Водяна пара, вологе повітря. Поняття про I-d діаграму, I-s діаграму.



## **Змістовий модуль 2:**

**Тема 2.1.** Теплообмін: загальні поняття, основні рівняння теплопровідності, конвекції, випромінювання.

**Тема 2.2.** Критерії подібності, критеріальні рівняння. способи визначення коефіцієнтів теплопередачі, розрахунку теплового потоку, температурного поля.

## **МОДУЛЬ 2. Паливо теплоносії. Теплогенератори. Класифікація сушарок і печей. Барабанні сушарки. Шахтні та обертові печі**

### **Змістовий модуль 3:**

**Тема 3.1.** Різновиди твердого, рідкого та газоподібного палива, їх характеристики. Розрахунок процесу горіння палива. Характеристика димових газів: склад, теплофізичні параметри.

**Тема 3.2.** Характеристики газодинамічного тракту теплових установок, розрахунок опорів, типи тяго-дутьєвого обладнання. Типи топкових пристроїв.

### **Змістовий модуль 4:**

**Тема 4.1.** Процес сушіння: кінетика сушіння матеріалів, напружений стан при сушінні виробів. Промислові сушарки: їх класифікація, матеріальний тепловий баланс сушарок. Розрахунок процесу сушіння з використанням I-d діаграми. Розрахунок барабанних сушарок, їх основні параметри. Газодинамічний розрахунки.

**Тема 4.2.** Процес випалу. Фізико-хімічні перетворення в матеріалах під час випалу. Промислові печі: класифікація, матеріальний, тепловий баланс шахтних і обертових печей. Розрахунок аеродинамічного тракту і систем аспірації димових газів.

**Тема 4.3.** Установки одночасного сушіння (дегідратації) і помелу матеріалів: загальні відомості, класифікація, матеріально-теплові баланси, розрахунок аеродинамічного тракту.

## **МОДУЛЬ 3. Процеси сушіння, випалу, плавлення матеріалів**

### **Змістовий модуль 5:**

**Тема 5.1.** Поняття про тепло- і масообмін при сушінні.



**Тема 5.2.** Характеристики сушарок для сипких матеріалів – сушарки зваженого шару, суспензійного типу (труби-сушарки). Сушарки для рідких суспензій (розпилювальні).

**Тема 5.3.** Принципи розрахунку сушарок. Сушарки для штучних виробів (тунельні, камерні, конвеєрні) – характеристики, технологічний та теплотехнічний розрахунок.

### **Змістовий модуль 6:**

**Тема 6.1.** Хімічна термодинаміка високотемпературних процесів (випал кераміки, цементного каменю, керамзиту).

**Тема 6.2.** Характеристика печей зваженого шару. Особливості теплової роботи обертових печей мокрого і сухого способу: теплообмінники, декарбонізатори.

**Тема 6.3.** Характеристика і розрахунок тунельних і щілинних печей (випал кераміки, відпалювання скла, металевих виробів).

## **МОДУЛЬ 4. Тепловологісна обробка виробів з бетону і залізобетону**

### **Змістовий модуль 7:**

**Тема 7.1.** Теоретичні основи тепловологісної обробки. Особливості теплообміну в установках ТВО. Масообмін при ТВО.

**Тема 7.2.** Режимы тепловологісної обробки. Термодинаміка процесу ТВО. Екзотермія.

**Тема 7.3.** Класифікація та основні конструктивні особливості установок періодичної та неперервної дії.

**Тема 7.4.** Розрахунок установок тепловологісної обробки. Матеріально-теплові баланси установок ТВО різного типу (камерні, тунельні установки, автоклави та ін.). Електротермообробка бетону.

*Структура залікового кредиту дисципліни, теми лабораторних і практичних занять а також зміст самостійної та індивідуальної роботи наведені в першій частині комплексу.*



## **2. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ НАВЧАЛЬНОЇ РОБОТИ І РОЗПОДІЛ БАЛІВ**

---

### **2.1. Загальні положення**

Для визначення рівня засвоєння студентами навчального матеріалу використовуються наступні методи контролю і оцінювання знань:

- поточний контроль знань передбачає оцінку систематичності (в тому числі відвідування занять) та активності роботи на практичних заняттях а також контрольні модульні тестування;
- виконання та захист лабораторних робіт;
- оцінювання самостійної роботи студентів;
- виконання індивідуальної роботи у формі двох курсових робіт, що виконуються у 6 та 7 семестрах;
- підсумковий контроль (екзамен), що проводиться переважно в тестовій формі, на який виноситься навчальний матеріал з усіх модулів навчальної програми.

При оцінюванні знань використовується кредитно-модульна система організації навчального процесу (КМСОНП) зі 100-бальною шкалою оцінювання\*. Розподіл балів, що присвоюються студентам за кожний модуль, а також шкала оцінювання знань за КМСОНП і ECTS наведені у таблицях 2.1 і 2.2.

### **2.2. Критерії, порядок оцінювання та нарахування балів**

1. Оцінювання успішності студента при засвоєнні змістових модулів дисципліни здійснюється на основі результатів поточного та підсумкового контролю.

2. Планом дисципліни передбачено проведення модульних тестових контрольних робіт (МКР) у формі контрольних тестових завдань. МКР може виконуватись як комп'ютерним способом, так і письмово. В останньому випадку використовуються спеціальні картки тестування. Мінімально можлива кількість балів, яку необхідно для зарахування МКР встановлюється додатково викладачем (як правило 35-40% від максимально можливої кількості).

---

\* Порядок оцінювання і рейтингування навчальних досягнень студентів у кредитно-модульній системі організації навчального процесу, НУВГП, 2007.



Таблиця 2.1

Розподіл балів за модулями

С е м е с т р 6			
<b>Модуль 1</b>			Сума
Змістовий модуль 1	Змістовий модуль 2	Тест №1	<b>52</b>
22	10	20	
<b>Модуль 2</b>			Сума
Змістовий модуль 3	Змістовий модуль 4	Тест №2	<b>48</b>
8	20	20	
<b>Всього (підсумковий контроль - залік)</b>			<b>100</b>
С е м е с т р 7			
<b>Модуль 3</b>			Сума
Змістовий модуль 5	Змістовий модуль 6	Тест №3	<b>22</b>
7	7	8	
<b>Модуль 4</b>			Сума
Змістовий модуль 7		Тест №4	<b>38</b>
23		15	
<b>Екзамен</b>			<b>40</b>
<b>Всього (підсумковий контроль - іспит)</b>			<b>100</b>

3. Без зарахування МКР а також лабораторних робіт, студент не може отримати підсумкову оцінку з дисципліни.

4. Неявка студента на модульний контроль (тестування) у встановлений термін оцінюється нульовим балом.

5. Перездача проміжного модульного контролю на вищу кількість балів дозволяється, як виняток, з поважних причин за погодженням з викладачем, з дозволу декану факультету.

6. У разі невиконання студентом певних завдань поточного контролю за графіком, визначеним індивідуальним навчальним планом, з поважних причин, що підтверджено відповідними документами, студент має право скласти їх у час і в порядку, визначеному викладачем, погодженим з деканом факультету.



Шкала оцінювання знань

Сума балів за всі форми навчальної діяльності	Оцінка в ECTS	Значення оцінки ECTS	Оцінка за національною шкалою	
			(залік)	(екзамен, курсова робота)
90-100	A	відмінно	зараховано	відмінно ("5")
82-89	B	дуже добре		дуже добре ("4")
74-81	C	добре		добре ("4")
64-73	D	задовільно		задовільно ("3")
60-63	E	достатньо		достатньо ("3")
20-59	FX	незадовільно з можливістю повторного складання	не зараховано	незадовільно ("2")
1-19	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни		незадовільно ("2")

7. Зарахування залікового кредиту в 7 семестрі здійснюється лише за результатами поточного контролю, в результаті якого студент може отримати від 0 до 100 балів (включно). Студент, який в результаті поточного контролю отримав менше 60 балів, для отримання позитивної оцінки може з дозволу викладача за погодженням завідувача кафедрою повторно виконати МКР або додаткові завдання самостійної роботи до початку наступного семестру.

8. Зарахування залікового кредиту в 8 семестрі здійснюється за результатами складання екзамену з урахуванням результатів поточного контролю. 60 балів відводиться на поточний контроль і 40 балів – на підсумковий контроль (семестровий екзамен).

9. В кожному семестрі студенти виконують курсову роботу, яка розглядається як окремий заліковий кредит (максимальна оцінка – 100 балів).

10. Контроль якості і повноти виконання завдань на практичних та лабораторних заняттях полягає в оцінюванні:

- рівня знань, необхідного для виконання лабораторних робіт, повноти, якості їх виконання і захисту;
- рівня знань і вмінь, продемонстрованого при розв'язуванні задач;
- вмінь представляти (захистити) результати виконаної роботи;
- активності при вирішенні колективних завдань;





– знань і вмінь під час застосування інших методів практичного або теоретичного навчання.

11. Контроль виконання ІРР (курскових робіт), передбачених робочою навчальною програмою дисципліни, полягає в оцінюванні:

- повноти виконання завдання;
- правильності виконання розрахунків;
- вміння викладати матеріал літературною мовою та якість оформлення звіту;
- результати захисту роботи (вміння представляти результати, повнота відповідей на запитання);
- вміння робити висновки та узагальнення.

12. Інші види роботи студентів, не передбачені планово, можуть заохочуватись у вигляді додаткових (понад отриманих в семестрі) балів. Загальна кількість заохочувальних балів не може перевищувати 10. Сумарна кількість балів в будь-якому випадку не може перевищувати 100.

13. Результати оцінювання успішності студентів за навчальним модулем реєструються за національною шкалою і шкалою ECTS в заліково-екзаменаційних відомостях.

14. Розподіл балів за формами навчальної діяльності наведено в табл. 2.3, нарахування балів за виконання ІРР – в табл. 2.4.

Таблиця 2.3

Розподіл балів за формами навчальної діяльності

**СЕМЕСТР №6**

№ модуля	Форма навч. діяльн	Вид контролю	К-сть балів за одне заняття	К-сть занять	Сума балів	Разом по ви-дам навчання	
1	лекції	відвідування	1	8	8	8	
	практичні	відвідування	1	8	8	24	
		активність участі в занятті	2	8	16		
	Модуль. контроль 1 (тестування)						20
	Всього по модулю 1 (макс. к-сть балів)						<b>52</b>
2	лекції	відвідування	1	7	7	7	
	практичні	відвідування	1	7	7	21	
		активність участі в занятті	2	7	14		
	Модуль. контроль 2 (тестування)						20
	Всього по модулю 2 (макс. к-сть балів)						<b>48</b>
Всього за два модуля (макс. к-сть)						<b>100</b>	
Інші види роботи студентів (заохочувальні бали) за два модуля, не більше						10	
*Прим.: В сумі з основною навчальною роботою за два модуля - не більше 100 балів							
<b>ЗАЛІКОВИЙ КРЕДИТ - ЗАЛІК (всього)</b>						<b>100</b>	
КУРСОВА РОБОТА №1 (оцінюється окремо)						<b>100</b>	





продовження табл. 2.3

№ модуля	Форма навч. діяльн	Вид контролю	К-сть балів за одне заняття	К-сть занять	Сума балів	Разом по ви-дам навчання
<b>СЕМЕСТР №7</b>						
3	лекції	відвідування	0,5	<b>9</b>	4,5	4,5
	практичні	відвідування	0,5	<b>3</b>	1,5	4,5
		активність участі в занятті	1	3	3	
	лабораторні	відвідування	0,5	<b>2</b>	1	5
		вчасність оформлення і захисту звіту	1	2	2	
		якість захисту	1	2	2	
	Модуль.контроль 3 (тестування)					8
Всього по модулю 3 (макс. к-сть балів)						<b>22</b>
4	лекції	відвідування	0,5	<b>6</b>	3	3
	практичні	відвідування	0,5	<b>5</b>	2,5	7,5
		активність участі в занятті	1	5	5	
	лабораторні	відвідування	0,5	<b>5</b>	2,5	12,5
		вчасність оформлення і захисту звіту	1	5	5	
		якість захисту	1	5	5	
	Модуль.контроль 4 (тестування)					15
Всього по модулю 4 (макс. к-сть балів)						<b>38</b>
Всього за два модуля (макс. к-сть)						<b>60</b>
Інші види роботи студентів (заохочувальні бали) за два модуля, не більше						10
*Прим.: В сумі з основною навчальною роботою за два модуля - не більше 100 балів						
<b>ЕКЗАМЕН</b>						<b>40</b>
<b>ЗАЛІКОВИЙ КРЕДИТ - ІСПИТ (всього)</b>						<b>100</b>
<b>КУРСОВА РОБОТА №2 (оцінюється окремо)</b>						<b>100</b>

Таблиця 2.4

Нарахування балів за виконання курсових робіт (6-7 семестри)

№	Вид контролю	Сума балів
1	Вчасність виконання розділів (відповідно плану) 4...5 етапів	30
2	Якість виконання роботи:	
2.1	Правильність, точність, повнота розрахунків, доцільність прийняття технологічних рішень, тощо	10
2.2	Оформлення пояснювальної записки	5
2.3	Оформлення графічної частини	10
2.4	Виконання в електр. вигляді	5
	Всього	30
3	Захист роботи	40
<b>Разом</b>		<b>100</b>



## 3. ПРОГРАМНИЙ МАТЕРІАЛ ЗМІСТОВИХ МОДУЛІВ (МОДУЛІ № 3-4)

### Модуль 3. ПРОЦЕСИ СУШІННЯ, ВИПАЛУ І ПЛАВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

#### 3.1. ПОНЯТТЯ ПРО ТЕПЛО- І МАСООБМІН ПРИ СУШІННІ

*Теоретичні основи процесу сушіння а також напружений стан при сушінні виробів розглядаються в частині 1 даного комплексу.*

##### **3.1.1. Зовнішній тепло- і масообмін при сушінні**

Сушіння будівельних виробів і матеріалів звичайно ведеться при невисоких температурах близько 100...200°C, при яких домінує конвективний теплообмін між сушильним агентом і матеріалом. Тому в будівельній індустрії застосовують конвективні сушильні установки.

При конвективному теплообміні потік теплоти  $q$  від сушильного агента до матеріалу можна визначити за формулою

$$q = \alpha(\bar{t}_{ca} - \bar{t}_{pm}), \quad (3.1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від сушильного агента до матеріалу;  $\bar{t}_{ca}$  – середня температура сушильного агента в установці;  $\bar{t}_{pm}$  – середня температура поверхні матеріалу в процесі сушіння.

Коефіцієнт тепловіддачі залежить від аеродинамічних умов обтікання матеріалу сушильним агентом, від властивостей сушильного агента, від питомої поверхні матеріалу, з якої відбувається випаровування, характеру руху сушильного агента і цілого ряду інших факторів.

В теплотехніці для опису умов тепловіддачі користуються системами диференціальних рівнянь, які здебільшого не можуть бути вирішені стосовно до конкретних умов. Тому конкретні умови тепловіддачі вивчають експериментально, а отримані дані в залежності від різних змінних факторів узагальнюють, користуючись теорією подібності. Для подібних явищ у якості обов'язкових закладають геометричну подібність, подібність фізичних структур, початкових станів і умов поверхневої взаємодії тіл з навколишнім середовищем. Таким чином,



складний процес тепловіддачі і масообміну замінюють залежністю між групою величин, які називають *критеріями подібності*. Ці процеси для різних випадків, що зустрічаються при тепловій обробці будівельних виробів, характеризуються основними критеріями подібності, наведеними нижче.

В умовах природної конвекції основним аеродинамічним критерієм є *критерій Архімеда (Ar)*:

$$Ar = L^3 g / \nu^2 (\rho_1 - \rho_2) / \rho_1, \quad (3.2)$$

де  $L = \sqrt{F}$  – характерний розмір матеріалу;  $F$  – поверхня тепло- і масообміну;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $\rho_1$  і  $\rho_2$  – густини вологого сушильного агента, відповідно біля поверхні матеріалу та у ядрі потоку;  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

При вимушеному русі сушильного агента основним аеродинамічним критерієм є *критерій Рейнольдса (Re)*:

$$Re = \frac{\omega L}{\nu}, \quad (3.3)$$

де  $\omega$  – швидкість потоку теплоносія;  $L$  – характерний розмір – довжина поверхні тепло- і масообміну в напрямку потоку сушильного агента;  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Фізичні властивості вологого газу (сушильного агента) характеризують термічний ( $Pr$ ) і дифузійний ( $Pr'$ ) критерії Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{a}; \quad Pr' = \frac{\nu}{D}, \quad (3.4)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості;  $a$  – температуропровідність;  $D$  – коефіцієнт дифузії.

*Критерій Фур'є (Fo)* характеризує зв'язок між швидкістю зміни температури і характерним розміром тіл, що піддаються тепловій обробці:

$$Fo = \frac{a\tau}{L^2}, \quad (3.5)$$

де  $a$  – температуропровідність;  $\tau$  – час;  $L$  – характерний розмір.

Зв'язок між тепловіддачею на поверхні тіла і передачею теплоти теплопровідністю всередині матеріалу описується *критерієм Біо (Bi)*:



$$Bi = \frac{a \cdot L}{\lambda}. \quad (3.6)$$

Вплив термодинамічних властивостей вологого сушильного агента на інтенсивність випаровування враховують *критерієм Гухмана (Gu)*:

$$Gu = (T_c - T_m) / T_c, \quad (3.7)$$

де  $T_c$  і  $T_m$  – абсолютні температури сушильного агента за сухим і вологим термометрами.

Якщо процес випаровування вологи з поверхні відбувається при температурі поверхні, відмінній від температури сушильного агента, а саме такі умови спостерігаються при сушінні будівельних виробів, то вводять *параметричний критерій  $\theta$* :

$$\theta = T_c / T_n, \quad (3.8)$$

де  $T_c$  – абсолютна температура сушильного агента за сухим термометром;  $T_n$  – абсолютна температура поверхні, з якої відбувається випаровування.

Подібність температурних полів і парціальних тисків на границі матеріал – сушильний агент визначається *термічним (Nu) і дифузійним (Nu') критеріями Нусельта*:

$$Nu = \frac{\alpha_k L}{\lambda}; \quad Nu' = \frac{\beta' L}{D}, \quad (3.9)$$

де  $\alpha_k$  – коефіцієнт конвективного теплообміну;  $\beta'$  – коефіцієнт масообміну;  $L$  – характерний розмір матеріалу;  $\lambda$  – теплопровідність;  $D$  – коефіцієнт дифузії.

Загальний вигляд критеріальної залежності для випадку теплообміну, ускладненого масообміном, може бути представлений у наступному вигляді:

– для умов теплообміну при природній конвекції:

$$Nu = f_1(Gr, Pr), \quad (3.10)$$

– для умов теплообміну при примусовій конвекції:

$$Nu = f_2(Re, Pr, Gu, \theta), \quad (3.11)$$



– для умов масообміну відповідно при природній і вимушеній конвекції:

$$Nu' = f_3(Ar, Pr'); \quad Nu' = f_4(Re, Pr', Gu, \theta). \quad (3.12)$$

Експериментальні дослідження дозволили встановити степеневий вигляд цих функцій. Отримані залежності приведені в монографіях і дослідженнях, присвячених процесам тепло- і масообміну, і застосовуються для їх розрахунку.

Користуючись критеріями Нусельта, формулу (3.1) визначення потоку теплоти  $q$  для зовнішнього теплообміну можна переписати у вигляді

$$q = Nu\lambda / L(\bar{t}_{ca} - \bar{t}_{пм}). \quad (3.13)$$

Стосовно конвективного теплообміну варто вказати на те, що потік теплоти  $q = \alpha(\bar{t}_{ca} - \bar{t}_{пм})$ , який одержує матеріал, витрачається на його нагрівання, на нагрівання вологи, що знаходиться у ньому і на випаровування вологи з поверхні матеріалу. В загальній витраті теплота, що витрачається на нагрівання матеріалу при постійній швидкості сушіння, значно менша, ніж затрачувана на випаровування вологи з поверхні. Волога матеріалу враховується при його нагріванні. Залежність, що представляє балансове рівняння теплоти для процесу сушіння, з деяким наближенням записують в такому виді:

$$\alpha(\bar{t}_{ca} - \bar{t}_{пм}) = r\rho_0 R_v \frac{dU}{d\tau} + c\rho_0 R_v \frac{dt}{d\tau}. \quad (3.14)$$

В правій частині балансового рівняння перший член  $r\rho_0 R_v \frac{dU}{d\tau}$  враховує витрату теплоти на випаровування вологи (зменшення вологовмісту матеріалу  $\frac{dU}{d\tau}$ ), а другий  $c\rho_0 R_v \frac{dt}{d\tau}$  враховує теплоту, витрачену на зміну температури матеріалу  $\frac{dt}{d\tau}$ .

Інші значення в цьому рівнянні:  $r$  – теплота випаровування (пароутворення), рівна теплоті пароутворення і енергії, що витрачається на подолання сил зчеплення вологи з поверхнею;  $\rho_0$  – густина матеріалу;  $c$  – питома теплоємність матеріалу;  $R_v$  – відношення об'єму матеріалу до його поверхні, з якої відбувається випаровування.



В процесі сушіння величина  $dU/dt$  – від'ємна, тому швидкість нагрівання і швидкість сушіння при підсумовуванні рахують по їх абсолютних значеннях. Потік вологи  $q_m$ , що асимілюється навколишнім середовищем, описується *формулою Дальтона*, яка встановлює зв'язок між фізичними параметрами, що впливають на швидкість випаровування:

$$q_m = \alpha_m (P'_{\text{пм}} - P'_{\text{са}}) \frac{V}{B'}, \quad (3.15)$$

де  $\alpha_m$  – коефіцієнт масообміну;  $P'_{\text{пм}}$  – парціальний тиск водяної пари на поверхні матеріалу;  $P'_{\text{са}}$  – парціальний тиск водяної пари сушильного агента;  $V$  – барометричний тиск при нормальних фізичних умовах;  $B'$  – існуючий барометричний тиск.

Ця формула в критеріальній залежності може бути представлена у вигляді:

$$q_m = Nu' D' / L (P'_{\text{пм}} - P'_{\text{са}}), \quad (3.16)$$

де  $Nu'$  – дифузійний критерій Нусельта;  $D'$  – коефіцієнт дифузії, віднесений до градієнта парціального тиску;  $L$  – характерний розмір;  $P'_{\text{пм}}$  і  $P'_{\text{са}}$  – відповідно парціальний тиск водяної пари на поверхні матеріалу і в сушильному агенті.

При ізотермічних умовах між коефіцієнтами дифузії  $D$  і  $D'$  існує співвідношення  $D = D' R_{\text{п}} T$ .

Для перерахунку коефіцієнта дифузії водяної пари на будь-яку температуру і тиск користуються формулою:

$$D = 0,0754 \left( \frac{T}{273} \right)^{1,89} \cdot (B/B') / R_{\text{п}} T, \quad (3.17)$$

де  $D$  – коефіцієнт дифузії,  $B$  та  $B'$  зазначені у формулі (6.19);  $R_{\text{п}}$  – газова постійна пари;  $T$  – абсолютна температура повітряно-парової суміші.

Формули (3.11) і (3.15), що визначають взаємодію вологого матеріалу із сушильним агентом, справедливі для стаціонарного процесу сушіння – періоду постійної швидкості сушіння. При описі періоду спадаючої швидкості сушіння ці формули застосовують тільки для якісного аналізу процесу.





### 3.1.2. Внутрішній тепло- і масообмін

Теплота, що одержує поверхня матеріалу при зовнішньому тепло- і масообміні  $c\rho_0 R_v \frac{dt}{d\tau}$  (див. формулу 3.14), поширюється всередині матеріалу за рахунок теплопровідності. Волога при її випаровуванні з поверхні за рахунок виникаючого градієнта вологовмістів  $\nabla U$  починає переміщуватися по матеріалу й ускладнювати поширення теплоти в матеріалі.

Аналогічно зворотній задачі – зволоженню при тепловологісній обробці – процес внутрішнього теплообміну, ускладнений переміщенням вологи при сушінні, описується рівнянням:

$$q^B = -\lambda \nabla T + i q_m^B, \quad (3.18)$$

де  $\lambda$  – теплопровідність вологого матеріалу;  $\nabla T$  – градієнт температури;  $i$  – теплота, що переміщується в матеріалі з питомим потоком маси;  $q_m^B$  – щільність питомого потоку маси, що переміщується в матеріалі.

Волога при сушінні може переміщуватися всередині матеріалу у вигляді рідини або пари. Перенос пари, повітря і газів, що знаходяться в матеріалі, відбувається молекулярним способом за рахунок дифузії або молярним у результаті фільтрації під дією перепаду загального тиску. При видаленні вологи в процесі сушіння її місце займає повітря з навколишнього середовища. Таким чином, волога і повітря та їх рух по матеріалу взаємопов'язані. Пористість матеріалу в процесі сушіння зменшується, оскільки частки матеріалу при видаленні вологи зближуються і діаметр пор, і капілярів скорочується.

Потік маси при сушінні, як і при тепловологісній обробці, є функцією ряду змінних (див. модуль 4 даного комплексу), однак з достатньою точністю можна представити його густину як суму часткових потоків.

В загальному вигляді рівняння густини потоку маси буде

$$q_m^B = -a_m \rho_0 \nabla U - a_m \rho_0 \delta \nabla T - a_m \rho_0 \delta_p \nabla P, \quad (3.19)$$

де  $q_m^B$  – щільність питомого потоку маси, що переміщується в матеріалі за одиницю часу через одиницю поверхні,  $a_m$  – коефіцієнт потенціалопродності;  $\rho_0$  – густина абсолютно сухого матеріалу;  $\delta$  і  $\delta_p$  – тер-





моградієнтні коефіцієнти;  $\nabla U$ ,  $\nabla T$ ,  $\nabla P$  – відповідно градієнти вологовмісту, температури і тиску.

Рівняння поширення теплоти в тілі:

$$q^B = -\lambda \nabla T - i_1 a_m \rho_0 \nabla U - i_2 a_m \rho_0 \delta \nabla T - i_3 a_m \rho_0 \delta_p \nabla P, \quad (3.20)$$

де  $i_1$ ,  $i_2$  та  $i_3$  – кількість теплоти, що переміщуються відповідно з потоками маси за рахунок градієнтів вологовмісту, температури і тиску.

Обидва ці рівняння справедливі як для опису зволоження при тепловологісній обробці бетону, так і для зворотного йому процесу – сушіння.

## 3.2. СУШИЛЬНІ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОРОШКОПОДІБНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА СУСПЕНЗІЙ

*Сушильні установки для кускових матеріалів (барабанні сушарки) розглядаються в частині 1 даного комплексу.*

### 3.2.1. Пневматичні сушарки

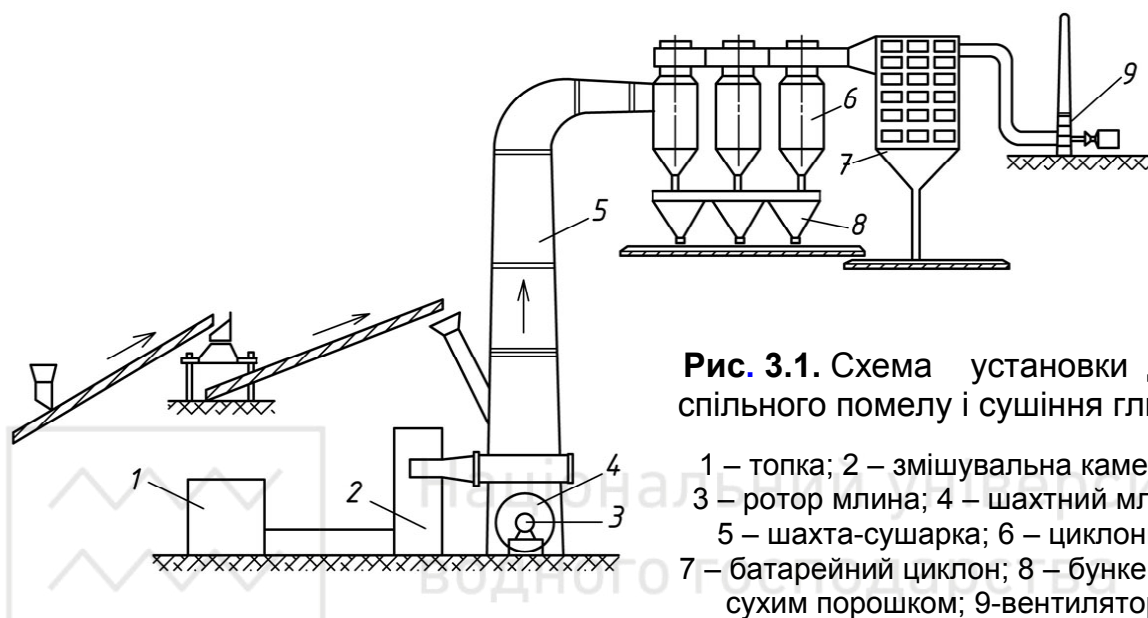
У пневматичних сушарках сушать як кускові, так і порошкоподібні (сипкі) матеріали: глину, вугілля, пісок та ін. Пневматичні сушарки можуть бути власне пневматичними, в яких здійснюється тільки сушіння, і пневмопомельні, де сушать і подрібнюють матеріали. У пневмопомельних установках сушіння матеріалів починається в процесі їхнього помелу в млині, що має пневматичне розвантаження і вентилюється гарячими газами або гарячим повітрям, що надходять з повітропідігрівника, і закінчується в трубі-сушарці в рухомому потоці гарячих газів або повітря.

На рис. 3.1 представлена пневмопомельна установка, що складається з декількох послідовно з'єднаних апаратів, з яких основними є млин і шахта-сушарка.

Топка служить джерелом теплоти і з'єднана з млином через змішувальну камеру, у якій гази розбавляють повітрям. Висушений матеріал відокремлюють від газів у пилоосаджувальних пристроях – циклонах, батарейних циклонах. Відпрацьовані гази викидаються вентилятором в атмосферу або частково повертаються в змішувальну камеру на рециркуляцію. Матеріал неперервно подається в млин за допомогою живильника з потоком газоповітряної суміші, що надходить зі змішувальної камери. Частилки подрібненого і підсушеного матеріалу, під-



хоплені потоком гарячих газів, через сепаратор виносяться в шахту. У сепараторі грубі недомелені частинки матеріалу відокремлюються від газів і повертаються в млин на домел, а дрібні остаточно висушуються в шахті і, відокремившись від газів у циклоні, надходять у бункери сухого продукту.



В котельних установках великої потужності, що працюють на пилоподібному паливі, пневмопомельні установки знайшли широке застосування для приготування пилоподібного палива. Їх установлюють поблизу топок парових котлів і обігривають гарячим повітрям, що подається вентилятором у млин. При цьому млин і труба-сушарка знаходяться під тиском і пилоповітряна суміш безпосередньо з труби вдувається в топкову камеру котла, згоряючи в ній факелом.

Якщо пилопідготовча установка має бункер готового паливного пилу, то після труби встановлюють циклон, що уловлює висушене паливо і направляє його в бункер запасу.

При установці вентилятора наприкінці сушарки вся система апаратів знаходиться під розрідженням.

Тип млина вибирають в залежності від виду матеріалу. Застосовують молоткові млини шахтного типу, аеробільні, рідше кульові. Шахтні млини не вимагають установки спеціального сепаратора, тому що сама шахта володіє сепаруючою здатністю і виділяє з потоку газів великі частинки матеріалу. Для підтримки постійної швидкості руху газів по висоті шахти вона має у верхній частині плавні звуження.



Аеробільні і кульові млини зазвичай виконують у комплекті із сепаратором. Гранична температура газоповітряної суміші, що надходить у млин, встановлюється режимом сушіння даного матеріалу з врахуванням конструктивних особливостей млина – її підшипників і способу їх охолодження.

Продуктивність пневматичних установок визначається продуктивністю млина і може бути достатньо різноманітною.

Пневматичні сушарки, як і інші види сушарок, крім їхньої оцінки за питомою витратою теплоти оцінюють ще за об'ємом вологи, що випаровується, за 1 год. з 1 м<sup>3</sup> об'єму. Ця величина називається *об'ємним напруженням сушильної установки* та застосовується при проектуванні для вибору типових агрегатів.

Завдяки інтенсивному теплообміну між дрібними частинками матеріалу і потоком газів сушильні труби відрізняються високим напруженням за вологою, що досягає 350...450 кг/(м<sup>3</sup>·год). Витрата теплоти на 1 кг вологи, що випаровується, складає близько 5000 кДж. Власне пневматичні сушарки являють собою вертикальну трубу-сушарку, у якій матеріал сушиться за схемою прямогоку, частіше у висхідному потоці газів. Вологий матеріал завантажують у нижню частину труби-сушарки і трохи нижче місця завантаження подають сушильний агент. Висушений матеріал у потоці відпрацьованих газів, виноситься нагору і, осаджуючись в циклоні, надходить у бункер.

Для транспортування матеріалу висхідним потоком газів, швидкість його руху повинна бути на 20...25% вищою за критичну. При критичній швидкості руху газів частинки матеріалу знаходяться в потоці у зваженому стані, і сила їхньої ваги, спрямована вниз, врівноважується піднімальною силою газового потоку. При швидкості нижче за критичну матеріал випадає з потоку газів. Критична швидкість залежить від діаметру частинок, густини матеріалу і густини газів при даній температурі. Дійсна швидкість руху газів у трубі коливається від 2 до 30 м/с в залежності від виду і тонкості помелу матеріалу.

Пневматичні сушарки не вимагають великої виробничої площі. Вони автоматизовані, забезпечують рівномірне і якісне сушіння, виправдовують себе економічно.

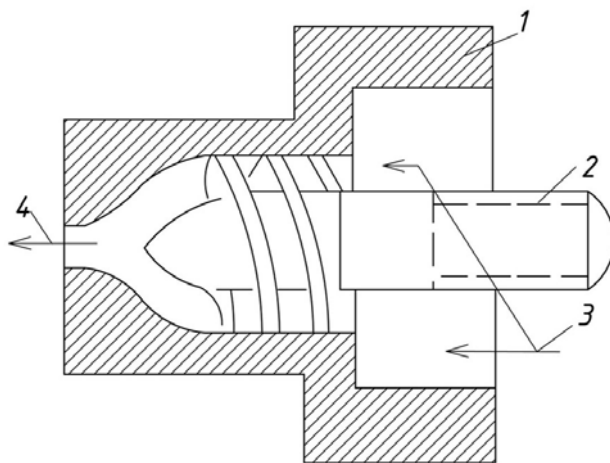
### **3.2.2. Сушильні установки для суспензій**

Суспензії типу глиняного шлікера сушать методом розпилення. Матеріал–суспензію диспергують у потоці сушильного агента і висушують. При високому ступені розпилення процес сушіння протікає



майже миттєво. Так як продукт не боїться розтріскування і короблення, то для сушіння використовують температуру до  $700 \dots 1000^\circ\text{C}$ .

Для розпилення суспензій застосовують механічні і відцентрові форсунки, а також відцентрові диски. У механічних і відцентрових форсунках струменям надають обертальний рух і за рахунок тиску  $1 \dots 3$  МПа одержують високотурбулізоване розпилення суспензії. На рис. 3.2 зображена схема найпростішого механічного розпилювача, що складається з корпусу 1 і металічної голки з гвинтовою нарізкою 2. Суспензія, що подається по каналах 3, надходить під тиском у розпилювач, отримує обертальний рух і, розпилена на дрібні частинки, за напрямом 4 викидається в камеру.

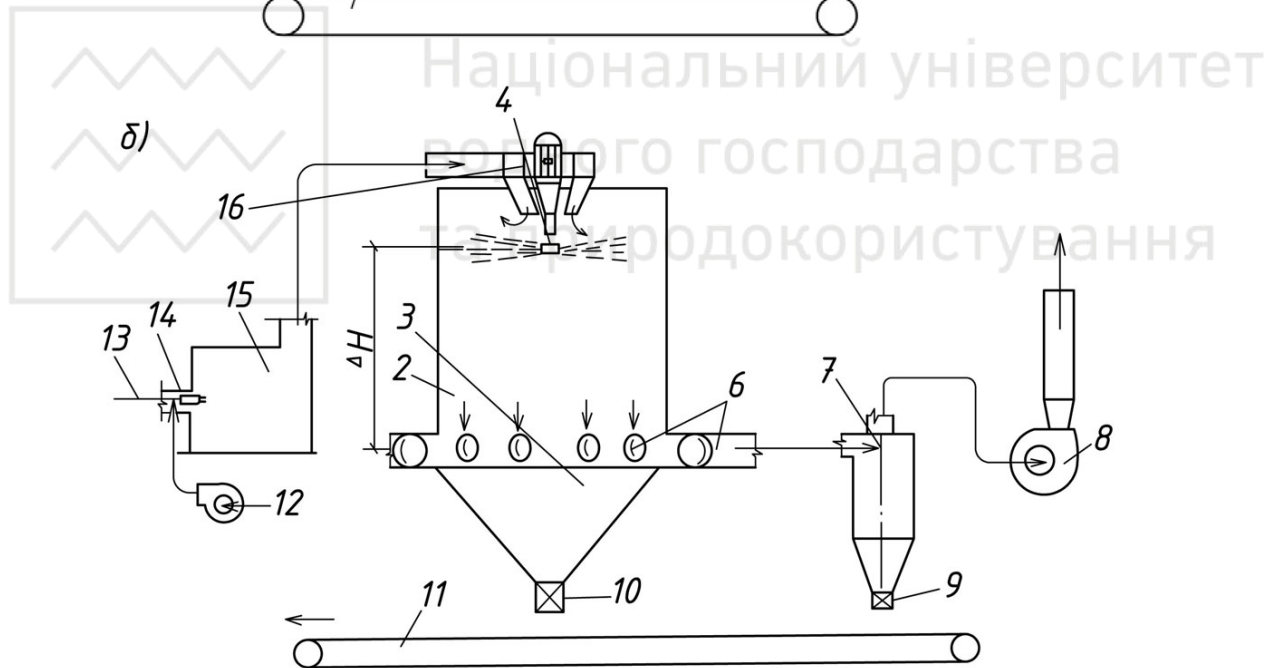
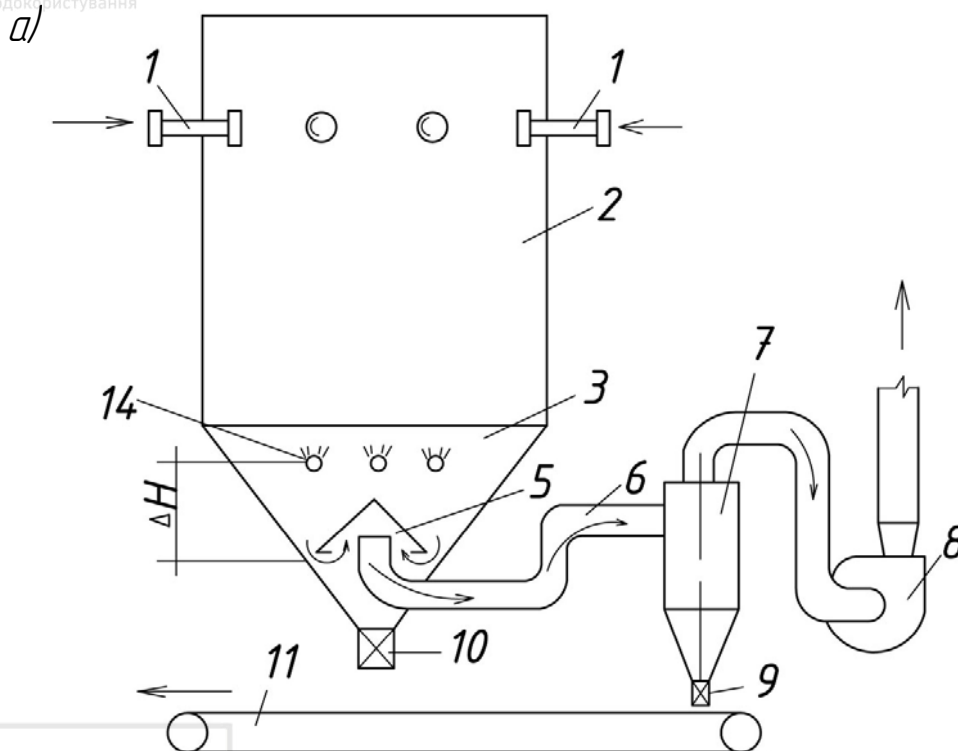


**Рис. 3.2.** Механічний розпилювач

1 – корпус розпилювача; 2 – голка з гвинтовою нарізкою; 3 – подача суспензії; 4 – викид розпиленої суспензії

На рис. 3.3, а показана *схема розпилювальної сушарки* для глиняного шлікеру з *механічними розпилювачами*. Сушарка складається з циліндричної камери 2 діаметром 4,5 м, оснащеної газовими пальниками 14. Циліндрична камера закінчується конусним днищем 3, у яке вмонтовані вісім механічних форсунок 13. Днище обладнане щелепним затвором 10 для вивантаження готової продукції. В конусне днище вмонтований патрубок 6 для відбору відпрацьованого сушильного агента. Патрубок обладнаний захисним конусом 5. Сушарка обладнана циклоном 7 для очищення відпрацьованого сушильного агента від виносу порошку. Циклон обладнаний затвором-блимавкою 9 для вивантаження осадженого порошку. Готова продукція надходить на конвеєр 11.

У сушарку під тиском  $1 \dots 1,5$  МПа механічними форсунками подається шлікер, що розпилюється в просторі камери. За рахунок спалювання газу в сушарці досягається висока температура ( $700 \dots 800^\circ\text{C}$ ), а за рахунок розпилення – турбулізація потоку. Відбувається швидке випаровування вологи, і відпрацьований сушильний агент надходить через патрубок 6 до циклону.



**Рис. 3.3.** Схеми розпилювальних сушильних установок

а – з механічними форсунками розпилення шлікеру; б – з дисковим розпиленням шлікеру; 1 – розпилювальні форсунки; 2 – металевий корпус; 3 – конусне днище; 4 – розпилювальний диск із приводом; 5 – захисний конус; 6 – трубопровід відбору продуктів горіння; 7 – циклон; 8 – вентилятор; 9 – пристрій для вивантаження порошку з циклону; 10 – щелепний затвор для вивантаження продукції; 11 – конвеєр відбору готової продукції; 12 – подача вторинного повітря в топку; 13 – подача газу і первинного повітря в пальники; 14 – пальники для спалювання газу; 15 – виносна топка; 16 – короби для подачі сушильного агента





Висушений глиняний порошок падає на днище і через щелепний затвор вивантажується на конвеєр. Відпрацьований сушильний агент очищується в циклоні від виносу глиняного порошку і з температурою порядку  $150^{\circ}\text{C}$  викидається в атмосферу. Осаджений у циклоні порошок через затвор-блимавку також вивантажується на конвеєр готової продукції.

Продуктивність приведеної розпилювальної сушарки складає 2000...2500 кг випаруваної вологи за 1 год. Питома витрата теплоти 5000...6300 кДж/кг випаруваної вологи. Питома витрата електроенергії на розпилення 0,005 кВт·год/кг.

На рис. 3.3, б показана схема розпилювальної сушарки з дисковим розпиленням шлікера 4 і виносною топкою. У топку 15 подаються газ і повітря 13 на горіння. Продукти горіння (сушильний агент) розбавляються вторинним повітрям 12 і з температурою  $600...700^{\circ}\text{C}$  через короби 16 подаються до факелу розпилення шлікера. Розпилений шлікер турбулізується подаваним сушильним агентом, матеріал швидко сушиться й у вигляді порошку осаджується на конусному днищі 3. Через щелепний затвор 10 порошок вивантажується на конвеєр. Відпрацьований сушильний агент опускається до патрубків 6, через них попадає в циклон 7, де очищується від виносів порошку і вентилятором 8 викидається в атмосферу.

Температура відпрацьованого сушильного агента в такій сушарці дещо нижча і складає  $110...120^{\circ}\text{C}$ . Зниження температури відпрацьованого сушильного агента в ній у порівнянні із вище розглянутою сушаркою відбувається за рахунок збільшеної відстані між завантаженням шлікера і відбором сушильного агента. Питомі витрати теплоти і електроенергії в такій сушарці на 5...7 % нижче, ніж у раніше розглянутої.

Об'ємне напруження поширених розпилювальних сушарок коливається від 5 до 20 кг/(м<sup>3</sup>·год) і залежить від початкової температури сушильного агента, що використовується. Чим вища початкова температура сушильного агента, тим більшою може бути прийнята питома напруження по волозі  $V_{\text{п}}$ . Так, для початкової температури сушіння  $200^{\circ}\text{C}$  приймають  $V_{\text{п}} = 5$  кг/(м<sup>3</sup>·год), а для  $700...800^{\circ}\text{C}$  –  $V_{\text{п}} = 20$  кг/(м<sup>3</sup>·год).



### 3.2.3. Сушарки киплячого шару

У сушарках киплячого шару частинки матеріалу висушуються знаходячись у псевдорозрідженому стані на решітці у потоці рухомого теплоносія.

Застосовують як однокамерні, так і дво- і трикамерні установки періодичної і неперервної дії. Сушарки періодичної дії доцільно застосовувати для одержання невеликої кількості матеріалу з постійною вологістю. Найбільшого поширення набули сушарки неперервної дії. Вони забезпечують високу продуктивність і об'ємне напруження за вологою.

Установки киплячого шару працюють за принципом протитоку:

матеріал рухається зверху вниз назустріч гарячим газам, проходячи послідовно ряд камер.

На рис. 3.4 наведена схема триступінчастої сушарки з киплячим шаром. Сушильний агент подають або під кожну решітку окремо, або він послідовно проходить усі решітки. Решітки мають круглі отвори, діаметр яких менше мінімального діаметру зерен матеріалу, що висушується. Живий переріз решіток складає 1,5...3%. Матеріал послідовно перетікає з верхньої решітки на середню, а потім на нижню через бічні вертикальні тічки.

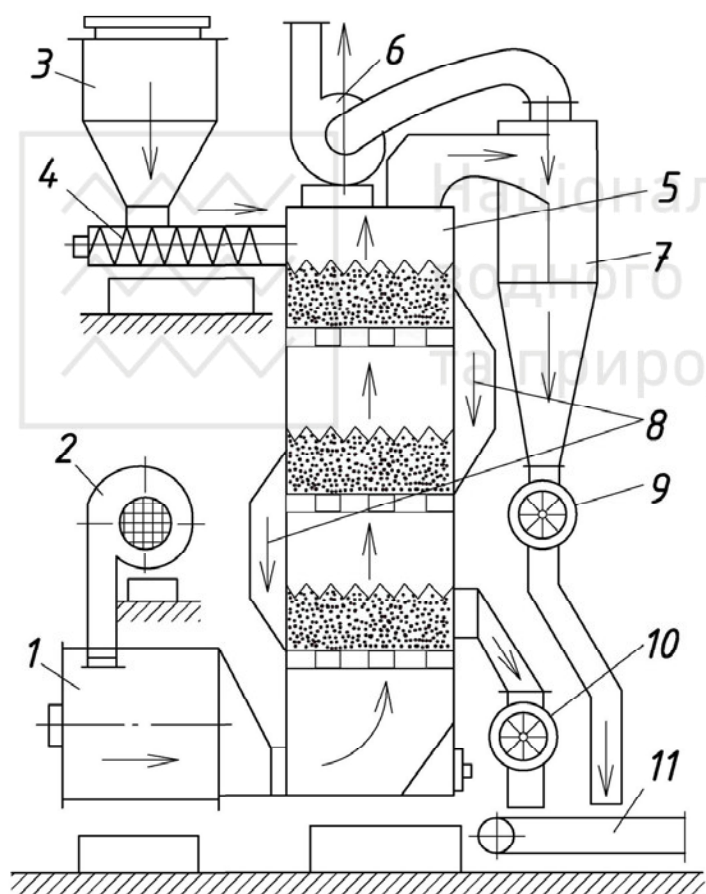


Рис. 3.4. Схема трикамерної сушарки киплячого шару

1 – топка; 2 – дуттьовий вентилятор; 3 – бункер вологого матеріалу; 4 – живильник; 5 – сушильна камера; 6 – димосос; 7 – пилоосаджувач; 8 – перетічки киплячого шару; 9 – вивантажувач-ущільнювач пилоосаджувача; 10 – розвантажувач-ущільнювач камери сушарки; 11 – конвеєр

Оскільки сушарки киплячого шару працюють під тиском, їх корпус повинен бути герметичним з метою уникнення вибивання сушильного агента через нещільності установки.





Висоту киплячого шару зазвичай підтримують в межах 0,7...0,75 м, тривалість сушіння в таких сушарках не перевищує 10 хв.

Сушіння в киплячому шарі – найбільш перспективний метод для кускових і сипучих матеріалів, однак у промисловості будівельних виробів і конструкцій він поки широкого поширення не одержав. Якщо порівняти сушарку з киплячим шаром і барабанною сушильною установкою за об'ємним коефіцієнтом теплопередачі (сумарний коефіцієнт, що враховує передачу теплоти конвекцією при русі частинок від нагрітих поверхонь – теплопровідністю, від газів і стінок – випромінюванням), то для сушарок з киплячим шаром цей коефіцієнт коливається в межах 6000...9000 Вт/(м<sup>2</sup>·°С), а для барабанних він не перевищує 580 Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Виходячи з цього, сушарки з киплячим шаром повинні займати менше місця, бути більш компактними і продуктивними.

Сушильні установки з киплячим шаром дозволяють крім сушіння одночасно класифікувати матеріал по фракціях. Однак і вони мають свої недоліки, до яких варто віднести підвищену витрату електроенергії для створення високої швидкості сушильного агента з метою утворення киплячого шару і порівняно високу питому витрату теплоти.

Об'ємне напруження сушарок киплячого шару коливається в межах 150...250 кг/(м<sup>3</sup>·год), питома витрата теплоти 5000...6500 кДж/кг випарованої вологи.

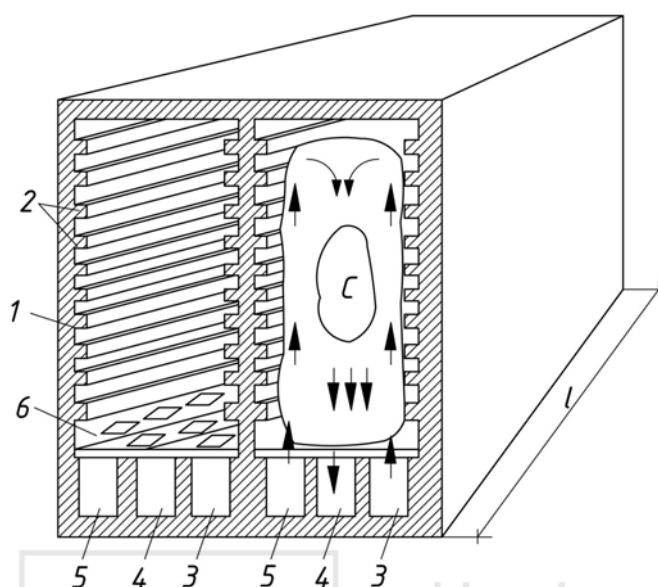
### 3.3. СУШИЛЬНІ УСТАНОВКИ ДЛЯ ФОРМОВАНИХ ВИРОБІВ

#### 3.3.1. Камерні сушарки

Основою для створення сучасних установок для сушіння штучних і листових виробів послужили камерні сушарки, перші конструкції яких були розроблені для самого розповсюдженого на той час будівельного виробу – глиняної цегли.

Схема найпростішої камерної сушарки періодичної дії показана на рис. 3.5. Камера 1 висотою близько 3,5 м розрахована на завантаження десяти полиць з цеглою. Ці полиці завантажувальною вагонеткою укладаються на виступи камери 2. Довжина камери 1 = 10...13 м. Нижче рівня підлоги камера має три канали 3...5, дві бічні (відмічені поз. 3 і 5) – для подачі сушильного агента, середній 4 – для його відбору. Канали перекриті настилами з отворами 6. Камери з'єднуються в бло-

ки по 20...30 шт. і мають загальне постачання сушильним агентом через підвідний канал і загальний примусовий відбір сушильного агента.



**Рис. 3.5.** Схема камерної сушарки

Сушильний агент через канали 3 і 5 потрапляє в камеру і, оскільки він легше повітря, що займає робочий об'єм камери, піднімається нагору (показано стрілками) доти, поки його маса в процесі охолодження не вирівнюється з повітрям камери. На шляху руху нагрітий сушильний агент віддає теплоту більш холодному матеріалу і починає рух донизу; поступово знижуючись, потрапляє в середній канал 4 і викидається в атмосферу. Змішування висхідних і низхідних потоків сушильного агента викликає багаторазову циркуляцію і досить рівномірне сушіння виробів. В середині сушарки, де сушильний агент опускається донизу, є зона слабого сушіння. Вона відзначена літерою С. Тривалість сушіння цегли в таких сушарках складає 2...3 доби. Витрата сушильного агента 4200...6300 кДж/кг випаруваної вологи.

Нерівномірність сушіння виробів по ширині камери є одним з головних недоліків камерних сушарок. Інший істотний недолік виявляється в значній тривалості процесу сушіння внаслідок невисоких швидкостей руху газів. Все це приводить до того, що даний тип сушарок не завжди може задовольняти вимоги сучасного виробництва: високу продуктивність і якість продукції, економію палива і виробничої площі, механізацію і автоматизацію обслуговування.

Інші конструкції камерних сушарок застосовують для сушіння різноманітного асортименту виробів, що вимагають індивідуального режиму сушіння і використовуються промисловістю в обмежених кількостях. Вони дають можливість в кожній камері здійснити індивідуальний для даного виробу режим сушіння.



### 3.3.2. Тунельні сушарки

Сушильні установки неперервної дії тунельного типу, одержали широке поширення при виготовленні цегли, черепиці, гіпсових виробів, керамічної плитки, санітарних керамічних виробів, труб і т.п.

В якості сушильного агента застосовують димові гази пічних установок або спеціальних топків у суміші з повітрям, а також повітря, нагріте калориферами або системами охолодження випалювальних печей. Рух сушильного агента і матеріалу може бути організований по наступних схемах: прямотоковій, протитоковій, комбінованій (прямотоково-протитоковій), струменевій, поперечній.

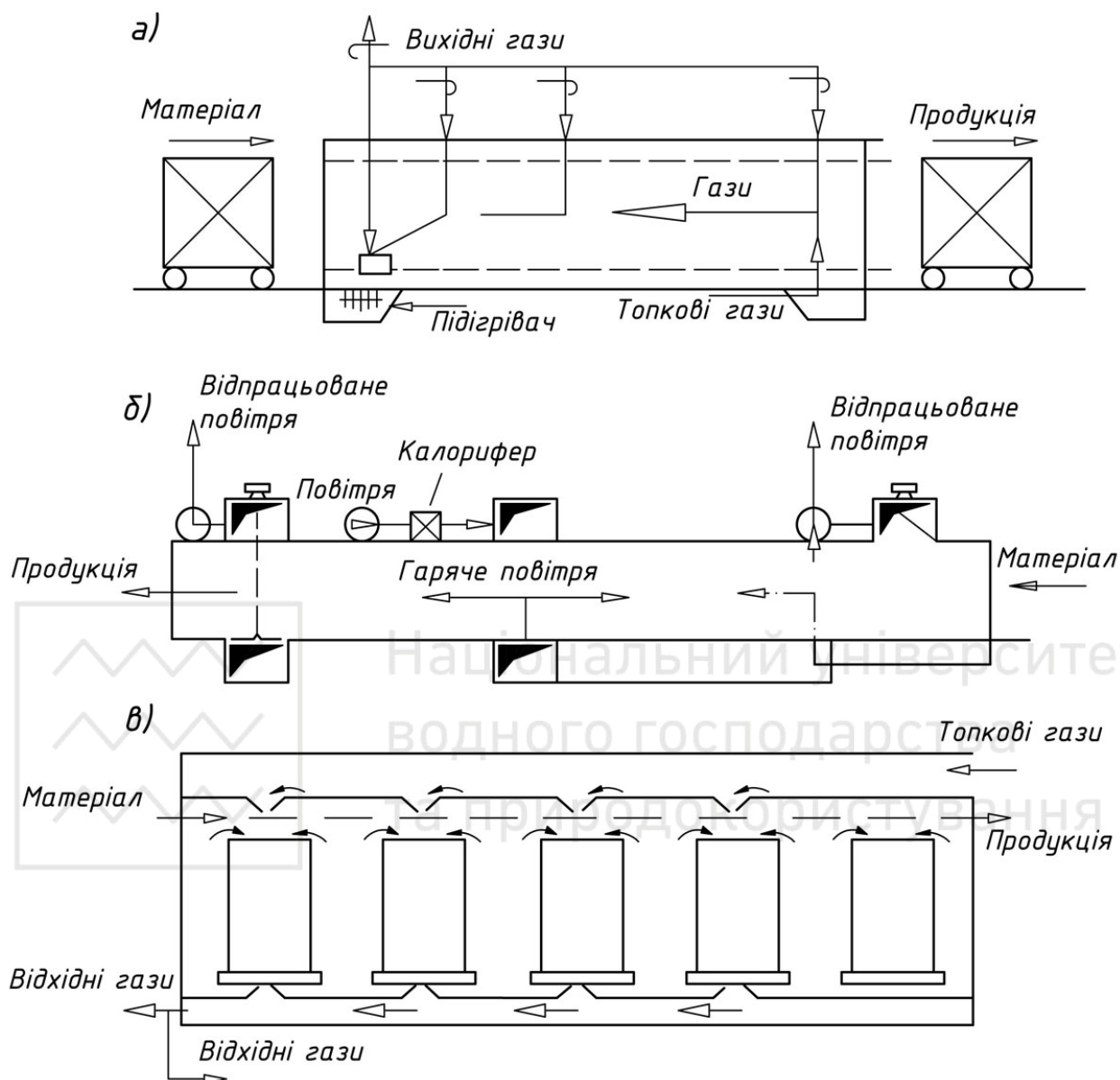
Тунельні камери виконують з легких теплоізоляційних бетонних плит або блоків; можливі каркасні конструкції з заповненням вільного простору утеплювачем. Камери мають довжину 25...50 м, ширину 0,8...1,4 і висоту 1...2 м; товщина зовнішніх стін 300...400 мм, перегородок 200...250 мм.

В залежності від способу транспортування виробів тунельні сушарки підрозділяються на вагонеткові, монорельсові і конвеєрні.

В роботі більшості *вагонеткових тунельних сушарок*, призначених для сушіння цегли-сирцю, використана протитокова схема (рис. 3.6,а).

Цеглу укладають на вагонетки у 8...10 рядів по висоті. Для підвищення продуктивності сушарки садка повинна бути щільною, причому щільність нижніх рядів на 25...30 % менше, ніж верхніх. Для покращення рівномірності омивання матеріалу сушильним агентом вільний прохід між садкою і стінками повинний бути мінімальним (не більше 50 мм); посередині або внизу садки залишають вільний канал для проходу газів. Вироби розташовують таким чином, щоб пустоти розташовувалися уздовж напрямку руху газів.

Топкові гази (сушильний агент) з колектора надходять у кілька розподільних каналів і через отвори в розвантажувальній стороні тунелю подаються в сушарку. Проходячи по тунелю, гази забирають вологу з матеріалу і через отвори в завантажувальній зоні викидаються в атмосферу, частково направляючи на рециркуляцію. Волога цегла-сирець зустрічає охолоджені вологі гази, що попереджає виникнення у виробках значних напружень і тріщин. Щоб уникнути конденсації водяної пари на холодному сирці сушарки обладнані системою рециркуляції або підігріву газів на ділянці входу сирцю.



**Рис. 3.6.** Схеми тунельних сушарок для формованих виробів

- а – сушарка із застосуванням вагонеткового конвеєра;
- б – вагонеткова сушарка для гіпсових блоків та архітектурних виробів;
- в – струменева сушарка для керамічних труб

Початкова температура газів 120...150°C, відпрацьовані гази мають температуру 30...50°C і відносну вологість 80...90%; витрата теплоти 4000...8000 кДж/кг випаруваної вологи; тривалість сушіння 16...48 год.

Прямоточкові тунельні вагонеткові сушарки являють собою блок з декількох тунелів (зазвичай 4-х) із загальним фронтом завантаження і вивантаження, паровим або топковим калорифером. Сушильний агент



через розподільні канали, розташовані під підлогою, подають вздовж камери (по ходу руху виробів) у завантажувальні зони тунелів. В зоні вивантаження через витяжні канали за допомогою димососа видаляють відпрацьовані гази. Дані установки призначені для сушіння прокатних *гіпсобетонних панелей*, встановлених у вертикальному положенні на вагонетках касетного типу. Форсований режим сушіння дозволяє знижувати вологість панелей від 25% до 10...12% за 20 год.; початкова температура газів 130°C, швидкість руху газів 1,7...2,0 м/с. Витрата теплоти при цьому складають близько 4800 кДж/кг випаруваної вологи.

Зміна аеродинамічної схеми на комбінований рух газів, підвищення початкової температури сушильного агента до 225°C і швидкості руху газів до 2,8 м/с дозволяють скоротити тривалість сушіння гіпсобетонних прокатних панелей до 12 год.

*Сушарки з комбінованою схемою руху сушильного агента* (рис. 3.6, б) працюють за прямоотоково-протитоковою схемою і призначені для сушіння гіпсових виробів або блоків. Зовнішнє повітря вентилятором продувають через калорифер або змішують з димовими газами в камері змішання. Сушильний агент подається в центральну частину тунелю (поблизу зони вивантаження) і розподіляється на два потоки: більша частина газів рухається за принципом протитоку назустріч виробам до завантажувального торця тунелю, а менша за принципом прямоотоку видаляє вологу, що залишилася, із уже підсушених виробів. При додатковій подачі газів у зону завантаження матеріалу сушарка може працювати як прямоотокова двохзонна.

Гаряче повітря із температурою 120°C висушує за 18...20 год. блоки розмірами 0,8×0,4×0,08 м від вологості 30...40 % до 5...8 %.

Інтенсифікація процесу сушіння гіпсових виробів може викликати появу тріщин, що виникають внаслідок пересушування поверхонь виробів сухими гарячими газами. Тому підвищення температури теплоносія повинне супроводжуватися підвищенням вологовмісту газів (за рахунок їх рециркуляції або зволоження). Так, при сушінні гіпсових блоків підвищення температури до 150°C і вологовмісту сушильного агента з 25 до 75 г/кг дозволяє скоротити тривалість сушіння до 10...12 год. за тієї ж швидкості газів.

В *струменевій тунельній сушарці* вироби пересуваються на підвісних вагонетках по монорейці. Ходові ролики вагонеток з'єднані ланцюгом у конвеєрну лінію.





При виробництві керамічних труб (рис. 3.6, в) вироби встановлюють вертикально і при пересуванні фіксують у строго визначених місцях. Струмінь сушильного агента через звужуючі сопла спрямований вздовж осі виробів. Швидкісний потік володіє ежектуючою дією і підсмоктує газ з вільного простору тунелю, збільшуючи об'єм газів, що проходять вздовж стінок виробів. Інтенсивний тепло- і масообмін характерний для усіх виробів в однаковій мірі, тривалість сушіння значно зменшується в порівнянні із сушінням виробів на вагонетках.

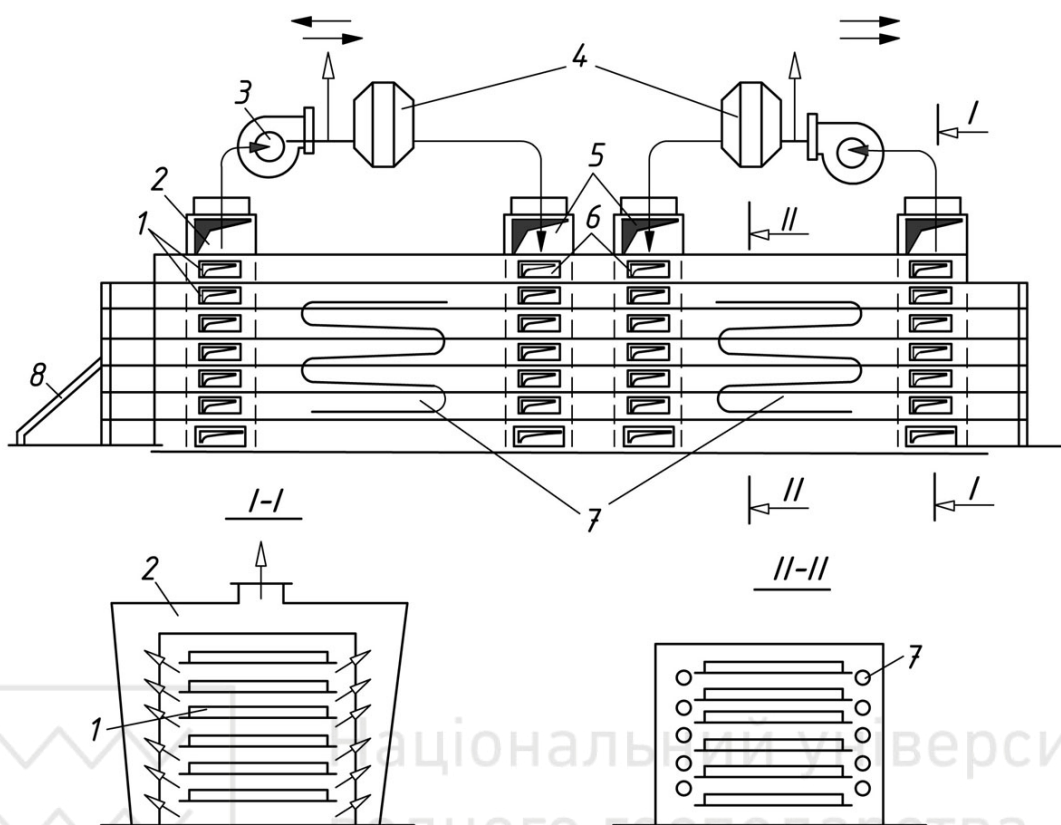
### **3.3.3. Сушарки для листових виробів**

Для теплової обробки листових виробів (гіпсокартонних листів, деревоволокнистих і мінераловатних плит) застосовують стрічкові і роликові конвеєрні сушарки. В таких установках сітчасту плетену або складену з окремих штампованих елементів стрічку натягають на ведучий і ведений барабани і пропускають через сушильну камеру. Натяг стрічки і швидкість руху регулюються.

Сушарки для листових виробів виконують багатоярусними з кількістю ярусів від 6 до 20 (рис. 3.7). Так, у двозонній шестиярусній сушарці для гіпсокартону листи матеріалу подаються послідовно на кожен ярус завантажувальним містком. У сушарці листи пересуваються за допомогою роликового конвеєра, що рухається зі швидкістю 0,9...1,9 м/хв. По ширині сушарки, довжина якої близько 40 м, укладають по два листи гіпсокартону.

Схема руху сушильного агента в установці передбачає два циркуляційних контури: противотоковий – в першій по ходу матеріалу половині сушарки і прямотоковий – в другій. В кожній із двох зон відпрацьований сушильний агент, змішуючись із зовнішнім повітрям, що надходить через торці камери, засмоктується через витяжні вікна 1 в бічних стінках тунелів у витяжні короби 2, а потім вентилятором 3 подається в калорифер 4. На виході з вентилятора встановлений клапан, що дозволяє надлишкову частину суміші викидати в атмосферу. Суміш, що залишилася, нагрівають до температури 110...130°C и по роздавальних коробах 5 через роздавальні вікна 6 подають у тунелі. Парові калорифери 4 не забезпечують високу температуру сушильного агента, тому в процесі просування по камері він додатково підігрівається паровими реєстрами 7.

Існує більш економічна конструкція сушарки з використанням димових газів. В ежекторній установці димові гази, що виходять з топки



**Рис. 3.7.** Багаторясна роликів сушарка

- 1 – витяжні вікна; 2 – витяжні короби; 3 – вентилятор; 4 – калорифери;  
 5 – роздавальні короби; 6 – роздавальні вікна; 7 – парові реєстри;  
 8 – завантажувальний місток

при температурі  $1000^{\circ}\text{C}$ , змішуються з атмосферним повітрям і з температурою  $450^{\circ}\text{C}$  подаються в сушарку між першою і другою зонами.

Розведений відпрацьованими зволженими газами сушильний агент із температурою  $240^{\circ}\text{C}$  в першій зоні рухається назустріч виробам, знижуючи свою температуру до  $140^{\circ}\text{C}$ . Потім його частково видаляють в атмосферу, а частково – подають на рециркуляцію. В другій зоні сушильний агент рухається паралельно з матеріалом, а по третій зоні він проходить за допомогою вентилятора. Оскільки вологовміст сушильного агента досягає  $90\text{...}150$  г/кг і дифузія вологи в матеріалі достатньо велика, то поверхня виробів не зневоднюється, а, отже, гіпс не дегідратується, незважаючи на високу ( $240^{\circ}\text{C}$ ) температуру газів. Тривалість сушіння складає близько 40 хв., продуктивність установки зростає на 30%.





Спалювання палива безпосередньо в робочому просторі установки є можливим в *конвеєрних стрічкових радіаційно-конвективних сушарках*. В робочій частині сушарки над сітчастою стрічкою, по якій рухається матеріал, на відстані 250 мм встановлені керамічні газові пальники, що розташовані під кутом один до одного і утворюють стелю робочої частини тунелю. Панель кожного пальника має випромінюючу поверхню  $0,06 \text{ м}^2$  і зібрана з 20 дірчастих керамічних плиток розмірами  $45 \times 65 \times 14 \text{ мм}$  із 860-ма отворами кожна. Підведений до пальників природний газ згоряє усередині перфорованих плиток, нагріваючи панель до  $800 \dots 850^\circ\text{C}$ ; основна частина теплоти передається випромінюванням ( $60 \dots 70 \text{ кДж/год на } 1 \text{ см}^2$ ). Відпрацьовані гази, проходячи по сушарці до витяжних вентиляторів, віддають теплоту конвекцією, прискорюючи процес сушіння. Сушіння керамічних плиток в тунелі довжиною близько 18 м проходить за 8 хв.

### 3.4. ВИПАЛ КЕРАМІЧНИХ ВИРОБІВ ТА МАТЕРІАЛІВ

*Загальні відомості про процеси випалу, зокрема в'яжучих речовин, розглянуті в першій частині даного комплексу.*

#### 3.4.1. Випал керамічних виробів

Керамічні вироби виготовляють з мінеральної сировини, в основному глинистих порід, що спікаються при високих температурах, набуваючи при цьому каменеподібних властивостей. Глинисті породи складаються з глиноутворюючих мінералів (каолініт, монтморилоніт, ілліт та ін.) і домішок (органічних, опіснюючих, флюсуючих), що зачиняються водою. Більш чутливі до випалу монтморилонітові глини, що містять понад 20%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , менш чутливі – гідрослюдисті глини (илліт). При  $450 \dots 600^\circ\text{C}$  каолініт втрачає воду і переходить у метакаолініт ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), що при  $700 \dots 800^\circ\text{C}$  розкладається з виділенням аморфних кремнезему і глинозему. Аморфний глинозем відразу ж з'єднується з оксидом магнію і дає шпінель з температурою плавлення  $2135^\circ\text{C}$ , що стає компонентом керамічного тіла. При температурі вище  $900^\circ\text{C}$  глинозем і кремнезем знову з'єднуються, утворюючи муліт ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) і аморфний  $\text{SiO}_2$ . Муліт стає керамічним тілом.

*Аморфний кремнезем* володіє великою реакційною здатністю. З домішками, що флюсують, (плавнями) він дає рідку фазу – склоподіб-



ний силікатний розплав, що цементує всю систему. Залишки аморфного кремнезему кристалізуються в кристобаліт.

Оксид заліза реагує з органічними домішками і переходить у більш реакційно здатний закис заліза. Останній вступає в реакцію з аморфним кремнеземом і утворює залізисті стекла, також цементуючу систему. Ці реакції йдуть особливо інтенсивно при випалі у відновному середовищі. Частина оксиду заліза, що залишилася кристалізується в мінерал гематит, що входить до складу керамічного тіла.

В якості домішок або добавок до глин використовують карбонати кальцію і магнію, сірчисті і залізисті сполуки, органічні речовини.

*Карбонати* в керамічних масах при температурі 700...1000°C дисоціюють, виділяючи вуглекислий газ. Якщо в цей період обробки керамічне тіло газопроникне, то порушень структури виробу не спостерігається, але пористість його може підвищитися. Якщо ж керамічний виріб щільний і достатньо міцний, то виділяється CO<sub>2</sub> створює в ньому пухирі і різного роду спучування. Кам'яністі карбонатні домішки при випалі перетворюються в грудки вапна. У процесі експлуатації вапно поглинає вологу з навколишнього середовища, гаситься, перетворюючись в гідроксид кальцію і збільшуючись в об'ємі в 4 рази. Від цього на поверхні виробу з'являються рвані здуття або він цілком руйнується.

*Сірчисті з'єднання* спричиняють на випалених виробках виплавки. При 550°C и наявності відновного середовища починається дисоціація сульфідів і сульфатів з виділенням SO<sub>2</sub>.

*Органічні речовини* при 350...400°C згоряють, виділяючи леткі речовини. Коксовий залишок вигорає повільніше і при більш високих температурах (700...800°C).

**Спінання** – найважливіший процес при випалі, при якому формуються властивості керамічного черепка. Воно відбувається за рахунок цементуючої дії евтектоїдних розплавів (рідинне спінання), реакцій у твердій фазі і кристалізації новоутворень.

*Рідинне спінання* додає керамічним виробам каменеподібні властивості. При цьому, при температурі близько 700°C, утворюється рідка фаза (склоподібний розплав), що інтенсивно розвивається з підвищенням температури. В міру збільшення кількості склоподібного розплаву керамічна маса розм'якшується, не втрачаючи однак здатності зберігати форму, раніше надану виробу. Такий стан виробу називають піропластичним.



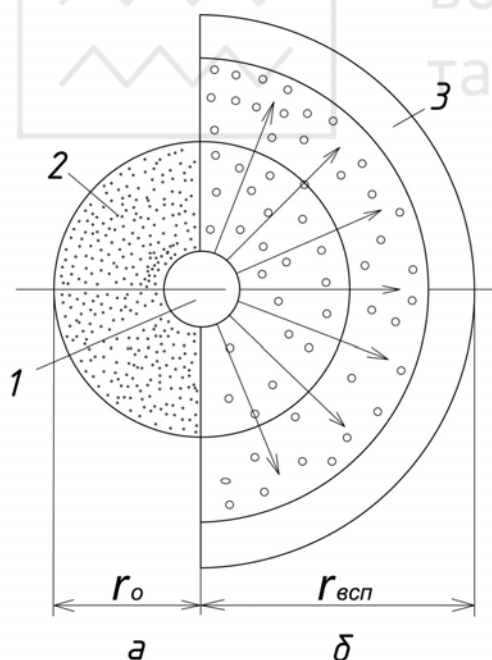
В період охолодження, в інтервалі температур 900...700°C, з піропластичного стану матеріал переходить в крихкий. В інтервалі температур 600...550°C це супроводжується модифікаційними перетвореннями, особливо кристалічного кварцу. Швидке охолодження в цьому інтервалі приводить до розпушення керамічного тіла і утворення тріщин.

Керамічні вироби випаляють у кільцевих, тунельних та інших печах, особливості роботи яких розглядаються нижче.

### 3.4.2. Процеси спучування і спікання при випалі штучних заповнювачів бетону

**Спучування** – це збільшення матеріалу в об'ємі за рахунок утворення і тиску газів всередині замкнутих пор. Так одержують *керамзит* із глинистих порід, *перліт* – зі склоподібних водомістких порід, *вермикуліт* – зі слюди, *ніздрювате скло* – зі штучних стекол та ін.

Глиниста сировина при наявності в ній в'язкого силікатного розплаву і газоподібних продуктів, здатних розвивати достатній тиск, при швидкому нагріванні спучується. При нагріванні сировини температура повинна досягти таких значень, при яких оболонка пори розм'якшується і спікається, що супроводжується її ущільненням, у результаті чого пора стає газонепроникною. Оболонка пори знаходиться в піропластичному стані, тобто здатна до пластичних деформацій без розриву суцільності. Якщо в цей момент всередині пори почнуть виділятися гази, то вони не пройдуть крізь ущільнену оболонку. Накопичуючись в порі, гази створюють надлишковий тиск, під дією якого розм'якшена від високої температури оболонка розширюється. Цей процес і є спучуванням елементарної комірки (пори) глиняної гранули (рис. 3.8).



**Рис. 3.8.** Спучування елементарної комірки глиняної гранули:

а – гранула до випалу; б – спучена при випалі гранула; 1 – пора; 2 – суха гранула; 3 – спечена оболонка

Для здійснення процесу спучування необхідно, щоб глина мала достатню



інтенсивність газовиділення і була приведена в піропластичний стан, а також фактори повинні збігатися в часі.

Джерелами газовиділення в глинах є реакції розкладання і відновлення оксидів заліза і хімічно зв'язана вода глинистих мінералів. Карбонати, що зустрічаються в глинах у вигляді вапняку, доломіту і сидериту, дисоціюють з виділенням  $\text{CO}_2$ . Так, при розкладанні 2...4 % карбонатів кальцію і магнію, що містяться в 1 т глинистої сировини виділяється 20...60 м<sup>3</sup>  $\text{CO}_2$ . Розкладання сірчистих з'єднань у глині в присутності вуглецю супроводжується виділенням  $\text{SO}_2$  і  $\text{CO}_2$ . У процесах спучування бере участь і повітря, замкнуте у порах гранул, а також гази від згоряння органічних речовин.

Піропластичний стан глини визначається кількістю рідкої фази (силікатного розплаву). Інтенсивність накопичення її залежить від хімічного складу глини. Зі збільшенням кількості кремнезему і глинозему глини стають більш тугоплавкими, подовжується температурний інтервал утворення розплаву і кількість його зменшується.

Процес формування структури при випалі спучених керамічних матеріалів розвивається в три температурних етапи. *Етап I* (інтервал температур 100...800°C) – це видалення фізично і хімічно зв'язаної води, часткове вигорання органічних добавок і домішок. За рахунок цього утворюються пори різних розмірів від 0,1 до 10 мк. *Етап II* (800...1050°C) характеризується утворенням зовнішньої спеченої оболонки і початком процесу спучування. Розвиваються твердофазні реакції і підвищується кількість рідкої фази. За рахунок цього продовжується процес утворення пор, розміри яких стають більш однорідними. *Етап III* (1050...1200°C) – інтенсивно розвиваються і завершуються процеси спучування, росте кількість середніх і крупних пор радіусом до 50 мк. Загальна пористість спученого матеріалу досягає 70...90 %.

Процес спучування носить вибуховий характер. Різниця між температурами початку оплавлення гранул і тією, при якій насипна густина гранул знижується до 950 кг/м<sup>3</sup>, – це *температурний інтервал спучування*. Так, у довгоплавких глин він складає 150...200°C, короткоплавких — 30...50°C. Чим більше інтервал спучування, тим краще умови для пороутворення.

Інтервал спучування збільшують оксиди заліза, алюмінію, титана, кремнезем у складі глинистих мінералів і в аморфному стані, органічні домішки і добавки. При спучуванні глин в обертових печах інтервал спучування повинний бути не меншим 50°C. Якщо неможливо подов-





жити інтервал спучування, то щоб уникнути злипання при випалі гранули опудрюють вогнетривкою глиною або меленим піском.

Спучуваність глин залежить від багатьох факторів, основними з яких є режим нагрівання і характер газового середовища. Режим нагрівання створює визначену інтенсивність теплообміну, тобто визначений температурний перепад між поверхнею і центром випалюваного матеріалу, наприклад гранул.

Характер газового середовища пічного простору і всередині пор матеріалу визначає якість спучування. Відновне середовище знижує температуру спучування і підвищує спучування глин. Важливо, щоб таке середовище було в порах гранул, що досягається наявністю відновних реакцій у випалюваному матеріалі. Для цього модифікують вихідну сировину, вводять до її складу спеціальні добавки. Так, введення залізовмісних добавок у кількості 5...10 % від маси глини підвищує спучуваність в 1,5...2 рази.

*Природні водомісткі породи* (перліти, слюди, вермикуліти) містять до 10 % кристалізаційної і цеолітної води, частина якої знаходиться в замкнутих порах. При нагріванні матеріалу до 900...1300°C вода перетворюється в пару, в результаті чого породи спучуються, збільшуючись в об'ємі в 14...20, а іноді й у 40 разів. Тривалість спучування складає 0,5...3 хв. Аналогічно спучуються і штучно створювані сировинні суміші, до складу яких вводять газоутворювачі (кокс, антрацит, крейда). Так одержують, наприклад, ніздрювате скло.

**Спікання** пористих матеріалів – це сполучення дрібнозернистих і порошкоподібних матеріалів у шматки при підвищених температурах. В якості вихідної сировини використовують глини, глинисті породи або суміші на їх основі. З пористого конгломерату одержують штучний пористий заповнювач – аглопорит, що виготовляють *методом агломерації*, тобто омонолічуванням у конгломерат гранул, виготовлених обкочуванням порошкової сировинної суміші або дробленого щебеню з глинистих порід. На агломераційній решітці шар матеріалу (20...30 см) чергується із шаром паливовмісного матеріалу, маса якого складає 6...10 % від маси сухої шихти. Крізь ці шари і решітку інтенсивно просочуються продукти горіння палива і повітря. Так здійснюється випал готового продукту.

Печі для випалу штучних заповнювачів бетону на основі глинистої сировини розглядаються нижче.



## 3.5. УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИПАЛУ КЕРАМІЧНИХ ВИРОБІВ ТА МАТЕРІАЛІВ

### 3.5.1. Печі для випалу формованих виробів

В промисловості будівельних матеріалів випалюють цеглу, керамічні камені, плитки, труби, діатомову цеглу, вогнетриви та інші вироби.

Випал цих виробів – заключна стадія технологічного процесу, яка у більшості випадків визначає якість готової продукції. Для випалу виробів застосовують неперервно діючі кільцеві, тунельні і щілинні печі, що є різновидом тунельних. Періодично діючі печі в даний час промисловістю не використовуються. Не будуються і кільцеві печі в їхньому традиційному виконанні через досить важкі умови праці при їх обслуговуванні. Однак у будівельній галузі дотепер працюють застарілі конструкції кільцевих печей, тому вони будуть коротко розглянуті.

#### Кільцеві печі.

Поширеність кільцевих печей (вперше з'явилися в 50...60-х роках XIX ст.) пояснюється простотою їх конструктивних рішень, економічністю і можливістю використовувати будь-який вид палива. Однак труднощі при впровадженні механізації завантаження і вивантаження матеріалу не дають можливості відносити ці печі до перспективних.

Кільцева піч (рис. 3.9) являє собою замкнутий випалювальний канал 1 еліпсоподібної форми, перекритий напівсферичним склепінням. В зовнішніх стінах випалювального каналу є отвори 2 – ходки, через які завантажують і вивантажують вироби (цегла, керамічний камінь). Відстань між осями сусідніх ходок умовно називають камерами, хоча ці камери розділових стінок не мають.

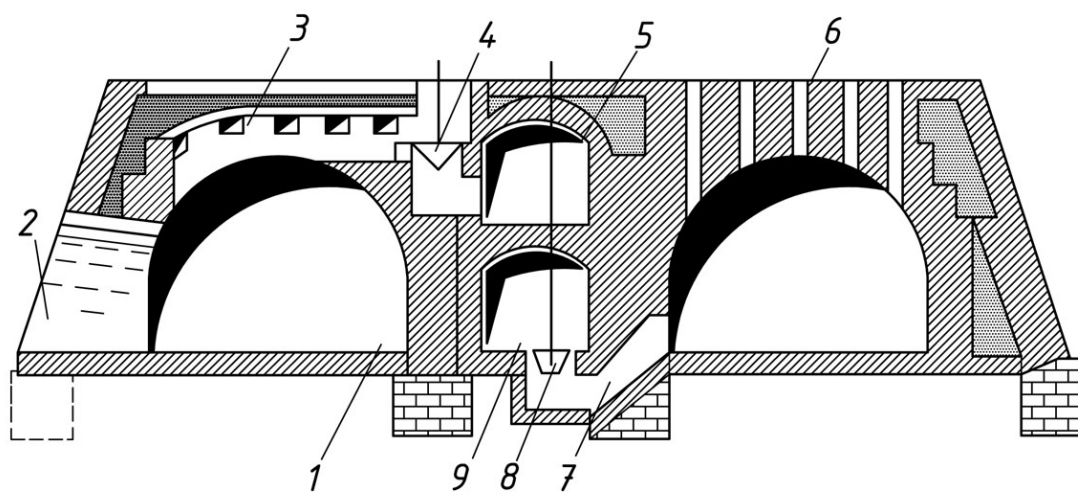


Рис. 3.9. Схема кільцевої печі



В середині печі обладнані два канали: нижній 9 – димовий, верхній 5 – жаровий. Кожна умовна камера з'єднана з димовим каналом за допомогою маленького каналу, називаного очілком 7. Перед з'єднанням кожного очілка з димовим каналом встановлений чавунний димовий конус 8, який можна відкривати і закривати.

В склепінні по всій довжині випалювального каналу печі через 1 м влаштовані наскрізні трубки 6 для засипання палива. Паливні трубки по ширині випалювального каналу влаштовують у чотири-п'ять рядів і зверху печі закривають в'юшками. Ряди паливних трубок з'єднані між собою і з жаровим каналом 5 каналами розсипного ладу 3. Кожен канал з'єднує два ряди таких трубок з жаровим каналом через жаровий конус 4. Щоразу після завантаження камери сирцем ходок закладають насухо подвійною цегельною стінкою. Поверхню закладеного ходка обмазують глиняним розчином. Кладка печі виконана з червоної цегли, внутрішні стіни футерують вогнетривом. Всередині димового каналу влаштований канал, що з'єднується з димососом печі.

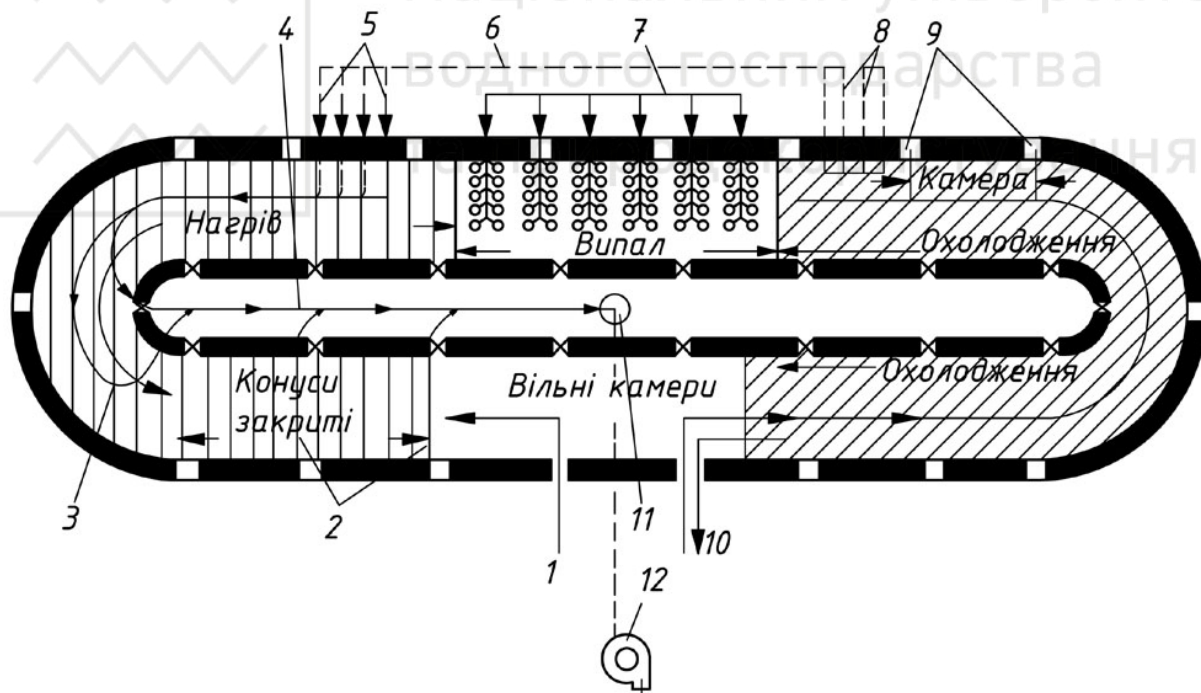


Рис. 3.10. Робоча схема кільцевої печі:

1 – камери для завантаження (садки) матеріалу; 2 – три паперових ширми двох камер із закритими димовими конусами; 3 – відбір продуктів горіння в два відкритих очілки димового каналу; 4 – рух відпрацьованих газів по димовому каналу до димососа; 5 – подача повітря в канал печі із зони охолодження через розсипний лад; 6 – рух нагрітого повітря по жаровому каналі (показано умовно поза піччю); 7 – подача палива в паливні трубки; 8 – відбір нагрітого повітря через розсипний лад у жарові канал; 9 – закладені кладкою ходки; 10 – вивантаження продукції; 11 – відбір відпрацьованого теплоносія з димового каналу до димососа; 12 – вентилятор-димосос





Робота кільцевої печі полягає в наступному. Весь пічний канал крім двох або трьох умовних камер завантажують матеріалом (на рис. 3.10 показані дві незавантажені камери). Ходки в ці вільні камери відкриті. Всі інші ходки закриті цегельною кладкою. Через лівий відкритий ходок безупинно надходить сирець. В міру завантаження кожної камери поперек печі встановлюють паперову перегородку – ширму. Через правий безперервно вивантажується готова продукція. В міру заповнення умовної камери сирцем її закривають. Одночасно вивільняється камера для вивантаження і праворуч відкривають ходок. В цьому випадку завантаження і вивантаження переміщуються відповідно вправо на один ходок. Так відбувається безперервне переміщення по всьому кільцю випалювального каналу.

Через неперервну роботу вентилятора–димососа в печі створюється негативний тиск (розрідження), повітря через відкриті ходки засмоктується в пічний канал і рухається проти годинникової стрілки, охолоджуючи матеріал. Кількість повітря, необхідного для охолодження випаленої продукції, значне, тому тільки частину його пропускають у зону випалу на горіння палива. Для цього перед зоною випалу (у зоні охолодження) відкривають чотири-п'ять димових конуси, куди спрямовується частина нагрітого повітря через канали розсипного ладу. Це повітря попадає в жаровий канал. Інше нагріте повітря проходить у зону випалу, куди через паливні трубки, знімаючи в'юшки, засипають паливо.

Деякі кільцеві печі переведені на газове опалення. В цьому випадку через паливні трубки опускають систему труб подачі газу. Паливо, згоряючи в зоні випалу, випалює вироби. Продукти горіння, продовжуючи рух у бік збільшення негативного тиску, попадають у зону нагрівання і поступово охолоджуються, віддаючи тепло матеріалу. Об'єм продуктів горіння за рахунок охолодження зменшується. Для збільшення об'єму продуктів горіння в зону нагрівання подають нагріте повітря, раніше відібране у жаровому каналі. Для його передачі в необхідній ділянці цієї зони відкривають чотири-п'ять жарових конуси (показано на рис. 3.10 верхньою пунктирною лінією).

Нагріте повітря попадає у випалювальний канал і разом із продуктами горіння просуваються по зоні нагрівання, поліпшуючи теплообмін. Як тільки закінчується завантаження виробів у вільній камері, і камера закривається паперовою ширмою, попередню ширму відкривають (проривають). Для відбору відпрацьованих газів перед діючою ширмою відкривається наступна пара димових конусів, а попередня



закривається. Відпрацьовані гази через димові очілки з відкритими конусами попадають у димовий канал, просуваються до каналу і через сполучний канал димососом викидаються з печі.

Розглядаючи роботу кільцевої печі в цілому, необхідно відзначити: вироби в печі стоять на місці, переміщуються працюючі в печі гази і відповідно зони, знаходячись увесь час на однаковій відстані одна від іншої. Найважчими операціями в роботі кільцевої печі є завантаження і вивантаження виробів, хоча певною мірою ці операції і механізовані.

На даний час пакет садки викладається поза піччю, потім автонавантажувачем через ходок завантажується в пічний канал і встановлюється на під (підлогу печі). Звичайно для завантаження поперечного переріза каналу потрібно 15...20 пакетів, встановлюваних у тричотири яруси. Верхня частина садки під склепінням викладається вручну. Температура у випалювальному каналі в місцях завантаження і вивантаження пакета досягає порядку 50...80°C, що робить працю дуже важкою. Крім того, в садці необхідно влаштовувати канали для проходження газів і повітря навколо кожного виробу. Причому, вгорі канали повинні бути меншими, ніж знизу, для того, щоб рівномірніше розподіляти гази по пічному каналу.

Керування процесом випалу здійснюється регулюванням подачі палива, зміною положення димових і жарових конусів і підтримкою стабільного режиму роботи зон.

Найважливіші показники роботи кільцевих печей: питома продуктивність складає 1500...2500 шт. цегли з 1 м<sup>3</sup> випалювального каналу на місяць; питома витрата умовного палива 130...140 кг/1000 шт. цегли.

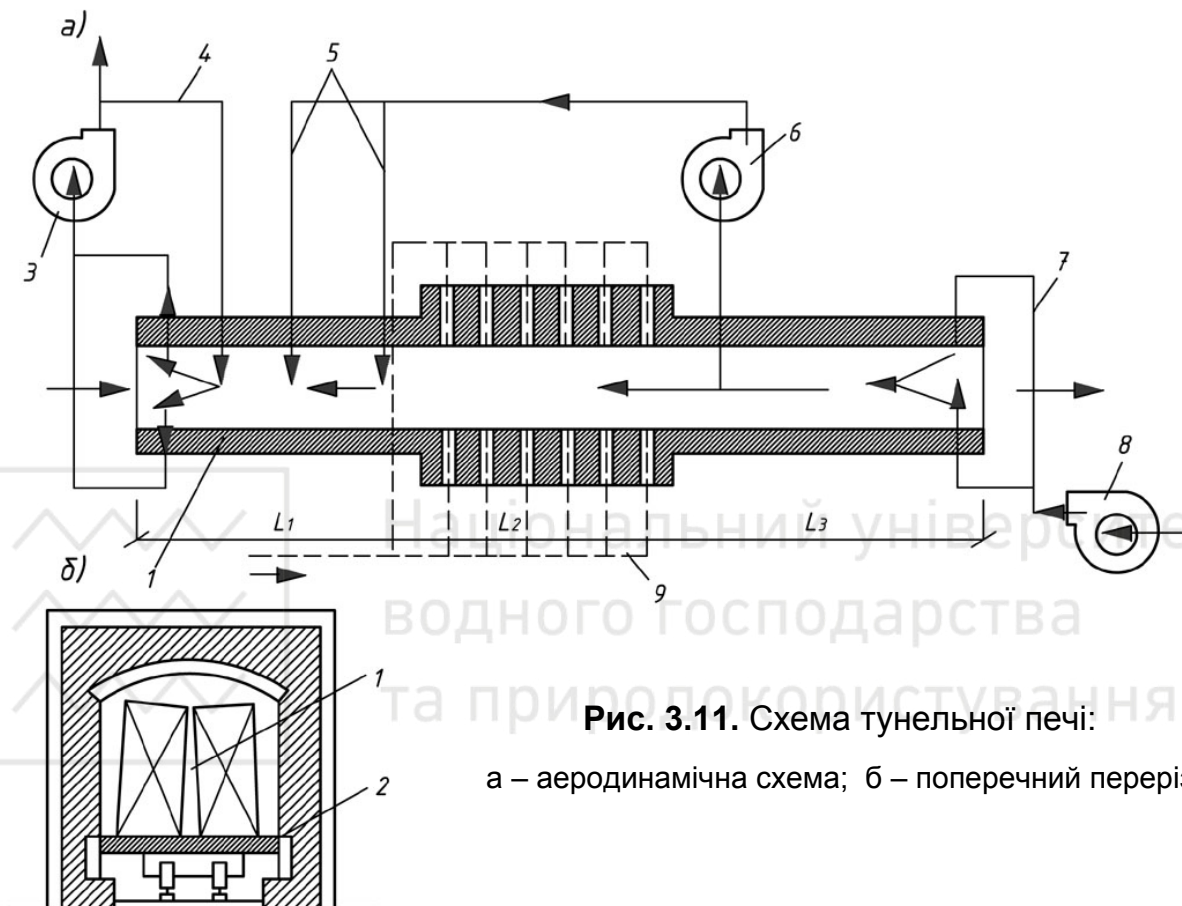
### **Тунельні печі.**

Тунельні печі (рис. 3.11) представляють собою робочий тунель (канал) 1, по якому з заданим ритмом переміщуються назустріч грубним газам вагонетки 2 або платформи з виробами. Теплові зони в печі розміщені стабільно, а оброблюваний матеріал переміщається відносно них.

Випалювальний канал печі – тунель 1, цілком заповнений вагонетками 2. Піч умовно розділена на зону нагрівання  $L_1$ , зону випалу  $L_2$  і зону охолодження  $L_3$ . Рух вагонеток здійснюється з інтервалами 30...40 хв. Подаючи завантажену вагонетку в зону нагрівання, одночасно за допомогою гідравлічного штовхальника проштовхують весь потяг, і з зони охолодження виходить вагонетка з готовою продукцією. Пакетне завантаження виробів виконується механічним укладаль-

ником. Загальна довжина тунельних печей 50...160 м, ширина випалувального каналу 1,4...4,5 м, його висота 1,5...2,5 м.

Продуктивність печі при тривалості випалу 36 год. складає близько 30 млн. шт. цегли в рік.



**Рис. 3.11.** Схема тунельної печі:

а – аеродинамічна схема; б – поперечний переріз

Аеродинамічна схема роботи печі виглядає наступним чином (рис. 3.11 а). В зону охолодження вентилятором 8 подається через трубопровід 7 зовнішнє повітря, що охолоджує вироби і частково в якості вторинного надходить на горіння в зону випалу. Інше повітря із зони охолодження відбирається вентилятором 6.

В зону випалу подається природний газ і первинне повітря по різних трубопроводах. На схемі подача газу і повітря показані умовно пунктирною лінією 9. Газ спалюється в камерах, утеплених в стіну печі, за допомогою пальників повного змішування. Тому факел не утворюється, і цегла, що знаходиться поблизу місць спалювання палива, не оплавляється. Температура горіння в зоні випалу складає близько 1200°C, максимальна температура випалу 1050...1100°C. Випалена



цегла пересувається в зону охолодження, а продукти горіння переміщуються в зону нагрівання.

Для того щоб зменшити розшарування температур по поперечному перерізі печі (рис. 3.11 б), в зону нагрівання вентилятором 6 із зони охолодження передається нагріте повітря. Оскільки, температура продуктів горіння, що переміщуються, в результаті віддачі теплоти цеглі знижується, то і об'єм їх також зменшується. Тому і передбачена подвійна подача нагрітого повітря 5. В цьому випадку об'єм пічних газів в зоні нагрівання зростає, а потік стає турбулентним. На завантаженні печі, поблизу місця відбору відпрацьованого теплоносія, з цією ж метою влаштовується часткова рециркуляція відпрацьованих газів 4. Вони зосереджено відбираються і вентилятором 3 викидаються в атмосферу.

Витрата умовного палива для такої печі складає 140...150 кг на 1000 шт. цегли.

### **Щілинні печі.**

Печі даного типу мають ширину робочого каналу, яка в декілька разів перевищує його висоту. Їх застосовують для однорядного по висоті випалу. При цьому усуваються недоліки штабельної садки (нерівномірність температур по перерізу штабеля), а цикл випалу скорочується в 30...40 разів. В таких печах висока однорідність температурних полів, тому спрощується конструкція опалювально-вентиляційної системи. Завантаження сирцю і вивантаження готових виробів із щілинної печі легко автоматизується. Тому такі печі добре вписуються в автоматизовані технологічні лінії по виробництву керамічних виробів.

Канал щілинної печі монтується з цегляної кладки, що укладена в металевий кожух. В стінах каналу змонтовані пальники. Конструктивно печі секційні; довжина секції 3 м, а всього каналу – до 60 м, ширина у світлі 1,3 м. В середині каналу розміщений транспортувальний пристрій – роликівий або стрічково-сітчастий конвеєр, на якому випалювані плитки укладають в один ряд по висоті. Обігрів двосторонній – зверху і знизу. Привідні ролики виготовлені із жаростійких сталевих труб діаметром 25...36 мм і товщиною стінки 2...5 мм.

Робочий канал печі по довжині розділений на три технологічні зони: підігріву, випалу й охолодження. Режим випалу ступінчатий і розраховується з умов допустимих швидкостей нагрівання на кожній ділянці температурної кривої. Початкова температура печі 400°C. На окремих її ділянках швидкості нагрівання й охолодження змінюються



від 45 до 90°C за хвилину. Тривалість випалу 42...100 хв. Газове середовище для забезпечення кондиційної якості плиток повинно бути окислювальне. Питома витрата умовного палива складає 2,7...3,5 кг/м<sup>2</sup>.

**Муфельні тунельні печі** відрізняються від звичайних відсутністю прямого контакту пічних газів із випалювальним матеріалом. Тепло передається через огороження, що виготовлене із вогнетривких муфельних коробок або плит. Процес нагрівання через них протікає повільно. Тому муфельне випалювання розповсюджене при виробництві керамічних виробів, для яких не допускається забруднення глазури або її відновлення продуктами спалювання палива та інші дефекти. В тепловому відношенні муфельні печі менш економічні, але забезпечують високу якість глазурованої поверхні. Працюють вони на твердому паливі та електроенергії. В даних печах випалюють тонку кераміку (фаянс, порцеляну, глазуровану лицювальну плитку).

### **3.5.2. Печі для випалу штучних заповнювачів бетону**

В технології збірного залізобетону широко використовуються штучні заповнювачі, такі, як керамзит і аглопорит, виготовлені з глини, перліт, одержуваний спучуванням перлітових порід, спучений вермикуліт та ін. Основна потреба промисловості в штучних заповнювачах задовольняється за рахунок керамзиту й аглопориту, тому нижче розглядаються випалювальні установки для виробництва цих матеріалів.

#### **Обертові печі для випалу керамзитового гравію.**

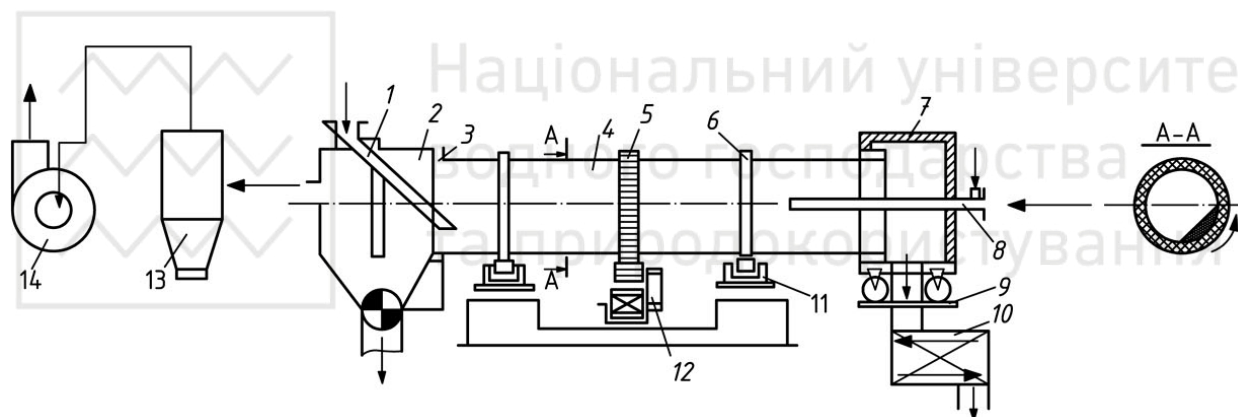
З обертових печей для випалу керамзитового гравію широко застосовується типова піч розміром 40×2,5 м. Іноді використовуються печі інших розмірів (22×2,3 м і 12×1,6 м).

Схема обертової печі для випалу керамзиту дана на рис. 3.12. Матеріал (підсушені гранули) завантажується в піч через тічку 1, розташовану в торцевій камері 2, у яку за допомогою ущільнювальних кілець 3 входить холодний кінець печі. Піч являє собою сталевий барабан 4, футерований зсередини вогнетривкою цеглою. На піч насаджена вінцева шестерня 5, за допомогою якої через редуктор 12 від електродвигуна піч приводиться в обертання зі швидкістю 4...6 хв<sup>-1</sup>. На печі наварені обичайки 6, що разом з піччю обертаються по опорних ро-



ликах *11* і утримують піч від переміщення. Гарячий кінець печі поставлений обладнаний голівкою *7*, у якій розміщений газовий пальник *8*. Відкатна голівка разом з газовим пальником може відкочуватися від печі по рейках *9*, звільняючи гарячий кінець пічного барабана для ремонту футерування.

Матеріал, потрапивши в обертову піч (кут її нахилу  $4...5^\circ$ ), пересувається до гарячого кінця. Коефіцієнт завантаження печі складає  $15...20\%$ . Завантаження і вивантаження матеріалу відбувається неперервно. Матеріал протягом перших  $25...30$  м повільно підігрівається до  $750...800^\circ\text{C}$ , а на останніх сімох-восьми метрах у результаті зіткнення зі факелом горіння газу різко підігрівається до температури порядку  $1000^\circ\text{C}$  і спучується. На останніх двох-трьох метрах печі (за вильотом газу з пальника) матеріал починає охолоджуватися і через відкатну голівку потрапляє в холодильник *10*.



**Рис. 3.12.** Схема обертової печі для випалювання керамзиту

Холодильник (відокремлений агрегат) – фактично є винесеною зоною охолодження печі. В холодильник на охолодження готового керамзиту подається зовнішнє повітря, що нагрівається, охолоджуючи матеріал, і через відкатну голівку попадає в піч, де використовується в якості вторинного на горіння газу. Первинне повітря на горіння подається в пальник. В зоні факелу горіння дійсна температура спалювання палива досягає  $1100...1150^\circ\text{C}$ . Після взаємодії з матеріалом у зоні спучування продукти горіння пересуваються до холодного кінця печі, підігріваючи матеріал. На виході з печі продукти горіння мають температуру  $600...650^\circ\text{C}$ ; вони надходять у циклон *13* і після очищення димососом *14* викидаються з печі. Газу, що відходять, внаслідок такої





високої температури використовуються для сушіння гранул, що готуються до випалу в окремі сушарці.

Процес теплообміну в обертових печах здійснюється шляхом теплопровідності, конвекції і випромінювання. Продукти горіння віддають теплоту поверхні шару матеріалу в низькотемпературній зоні конвекцією, у високотемпературній – випромінюванням і конвекцією. Крім того, продукти горіння нагрівають за допомогою випромінювання і конвекції футерування печі. Футерування при обертанні печі контактує із шаром матеріалу, що знаходиться на ній, і, в свою чергу, віддає теплоту матеріалу. Таким чином, цикли одержання теплоти футерування чергуються з циклами віддачі нею теплоти матеріалу. Частина теплоти втрачається в навколишнє середовище.

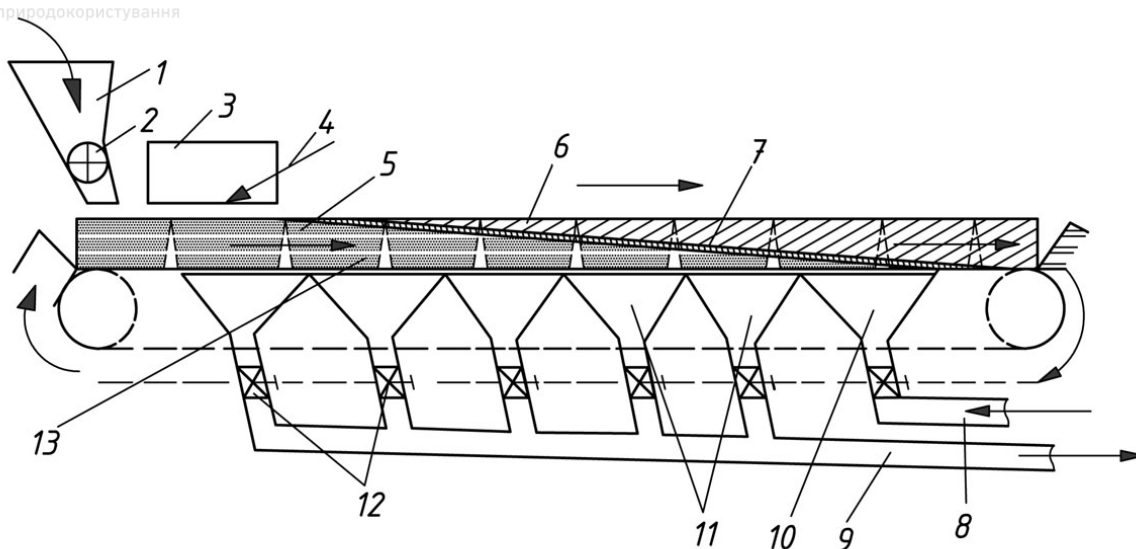
Зона охолодження готового керамзиту відіграє особливу роль в одержанні якісної готової продукції. Темп охолодження, пов'язаний з напруженим станом, що виникає від різниці температур на поверхні й у центрі гранул, визначає цілісність порових перегородок. Чим менше перегородок піддається руйнуванню, тим вищі міцнісні характеристики матеріалу. Тому охолодження гранул необхідно проводити повільно, з метою зменшення перепадів температур між поверхнею і центром гранул. На такому принципі ґрунтується одержання високоміцного керамзиту.

Витрата умовного палива на 1 т керамзиту для різних печей складає 100...130 кг.

### **Спікальні установки для випалу аглопориту.**

Для спікання (змонолічування) глиняних часток або гранул застосовують установки періодичної і неперервної дії. Установки періодичної дії (спікальні чаші) мало поширені. Неперервно діючі установки бувають карусельного і стрічкового типів, однак перші через складність їх конструкцій на даний час не використовуються. Схема стрічкової спікальної (або т.зв. стрічкової агломераційної) машини наведена на рис. 3.13.

Агломераційна машина складається зі станини, по якій рухаються безперервною стрічкою чаші – палети. Днище палет являє собою колосникову, газопроникну решітку з живим перерізом отворів близько 25...30%. Палети разом із решіткою відливаються з жаростійкого чавуну. Під палетами розташовані вакуум-камери.



**Рис. 3.13.** Схема стрічкової агломераційної машини

Робота агломераційної машини полягає в наступному. У вільну палету з бункера 1 через дозатор 2 на всю ширину палети, що на сучасних машинах досягає 1,5 м, завантажуються шихта, що складається з глини і необхідного для спікання кількості палива. Палета 5 із завантаженою шихтою просувається за стрілкою, показаною на рисунку, над вакуум-камерами і попадає під запальний пристрій 3 – горн. Горн обладнаний газовими пальниками 4, що запалюють у верхньому шарі шихти паливо. Переміщаючи вперед, палета увесь час знаходиться під вакуум-камерами 11. В результаті негативного тиску створюваного в них димососом, приєднаним до збірного каналу 10, через шихту просочується повітря. Повітря, проходячи через шар шихти, окисляє паливо. Відбувається процес горіння, за рахунок якого частки або гранули спікаються.

В міру просування палет пересувається і зона горіння палива. Розпечена зона (на палеті – червона смуга товщиною 1,5...2,5 см) пересувається вниз. Швидкість пересування зони горіння складає 8...12 мм/хв. В міру пересування зони горіння палива в шихті у верхній частині палет над зоною горіння знаходиться конгломерат 6, нижче зони горіння – шихта 13 з незгорілим паливом. Повітря, що просочується, через шар відбирає теплоту від конгломерату 6 і нагрівається. Нагріте повітря окисляє паливо в зоні горіння 7 і у вигляді продуктів горіння нагріває шар шихти 13, розташований під зоною горіння. Відпрацьовані продукти горіння через вакуум-камери 11 і збірний канал 10 викидаються після очищення димососом в атмосферу.



Регулювання в кожній вакуум-камері здійснюється індивідуально заслінками 12. Процес спікання шихти на всю товщину шару (250...300 мм) закінчується до надходження її в останню вакуум-камеру. Остання вакуум-камера 9 працює вже в іншому режимі. В неї через трубопровід 8 нагнітається повітря, і вона з вакуум-камери ніби перетворюється в звичайну камеру, в якій встановлюється надлишковий тиск холодного повітря. Повітря, просмоктуючись крізь шар конгломерату, здійснює його попереднє охолодження.

Таким чином, палета, проходячи над камерою 9, піддається попередньому охолодженню разом з матеріалом, що знаходиться в ній. Далі при русі палети через привідне колесо з неї вивантажується готова продукція, що направляється на остаточне охолодження в холодильник. Вивільнена від матеріалу палета проходить по нижній гілці і знову надходить на завантаження.

Продуктивність агломераційних машин складає 50, 100 і 200 тис. м<sup>3</sup> аглопориту на рік. Витрата умовного палива складає 100...110 кг на 1 т продукції.

### 3.6. ПРОЦЕСИ ПЛАВЛЕННЯ. ПЛАВИЛЬНІ УСТАНОВКИ.

**Плавлення** – це процес переходу твердої речовини в рідинний стан (розплав), що супроводжується поглинанням теплоти.

При постійному зовнішньому тиску матеріал плавиться при визначеній температурі – *температурі плавлення*, що залежить від природи речовини і тиску.

Температура плавлення залежить також від мінералогічного складу вихідної сировини і характеру газового середовища. У відновному середовищі температура плавлення істотно знижується.

Теплота, що витрачається на перехід одиниці маси речовини з твердого стану в рідкий при температурі плавлення, називається *питомою теплотою плавлення*. Багатокомпонентні речовини звичайно плавляться в деякому інтервалі температур, що залежить від їхнього складу і тиску середовища (наприклад, мінеральна вата, глазур, скло).

Хімічний склад вихідних речовин може бути природним і штучним (підібраним), але в будь-якому випадку він включає кристалічні й аморфні фази. Такий матеріал послідовно переходить стадії піропластичного, в'язкотекучого і рідинного станів.



Якщо в складі суміші є туго- і легкоплавкі компоненти, то їх співвідношення повинне бути таким, щоб тугоплавкі компоненти встигли розплавитися за час перебування суміші в плавильній установці. Тугоплавкі компоненти повинні мати більш тонкий помел, ніж легкоплавкі.

При плавленні кускових матеріалів розплав з'являється на їх поверхні, стікає з неї і оголює розплавлену поверхню. За рахунок цього зменшуються розміри і площа шматків. При плавленні порошкових сировинних сумішей перші краплі розплаву з'являються при евтектичних температурах на контактах окремих зерен. Тому порошки спочатку спікаються (змонічуються), набуваючи піропластичного стану, а потім при подальшому нагріванні спік переходить у розплав.

Теплообмін при плавленні має специфічні особливості для кожного типу установок. Загальним для усіх є залежність теплообміну від променепрозорості розплаву. Скляні розплави є найбільш променепрозорими і тому, випромінювані на поверхню розплаву теплові хвилі, проникають у товщу шару, здійснюючи об'ємний прогрів. Розплави гірських порід менш променепрозорі і одержуваний ними тепловий потік концентрується на поверхні розплаву, що визначає доцільність плавлення гірських порід і шлаків у тонкому шарі.

При виробництві мінеральної вати розплави одержують у вагранках, ванних і електродугових печах. Для одержання розплаву фритових глазурей застосовують ванні й обертові печі.

**Вагранки** (рис. 3.14) відносяться до групи шахтних протитокових пересипних печей. Шахта зварена з листової сталі товщиною 10...14 мм. Нижня частина її виконана у виді порожнього циліндра, усередині якого неперервно циркулює вода, охолоджуючи внутрішню поверхню – це *водяна сорочка*, з якої відходить вода з температурою 70°C.

Верхня частина корпусу 1 офутерована зсередини вогнетривкою цеглою 2, а в зоні завантаження – чавунними сегментами 3, що сприймають ударні навантаження матеріалу, що завантажуються. Днище шахти 4, що розкривається, зсередини офутероване вогнетривким набиванням 5 з ухилом для стоку розплаву до льотки 6 – вивантажувального отвору діаметром 55...65 мм. В нижній частині шахти вмонтовані фурми 7 – труби діаметром 50...100 мм, через які повітря надходить у шахту з кільцевого колектора 8. В колектор повітря нагнітається дуттьовим вентилятором 9 або повітродувкою. Фурми розташовуються в 1...3 ряди по 8...16 шт. в кожному.

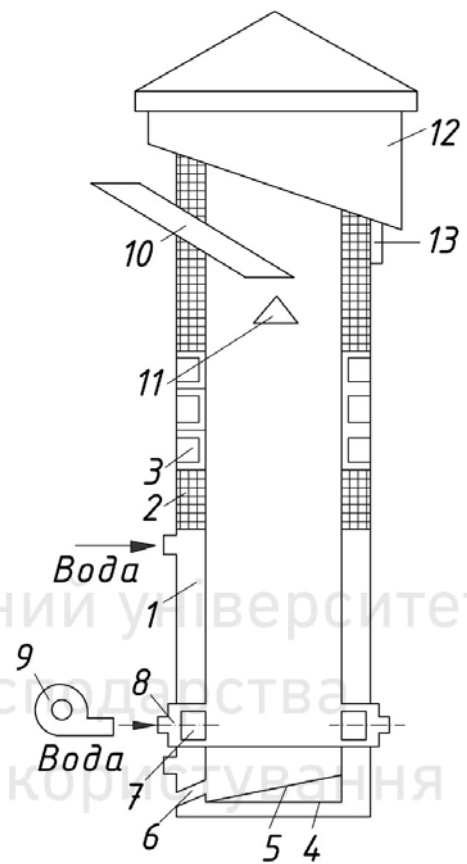


Через завантажувальний отвір *10* у шахту подають сировинні матеріали і кокс. В середині шахти знаходиться конус *11*, за допомогою якого матеріал, що завантажується, і паливо рівномірне розподіляються по перерізу. Над верхньою горловиною шахти укріплений металевий ковпак *12* зі скошеним днищем – іскрогасник, по похилому днищу якого скачуються тверді частки, що випадають з газового потоку, а потім виводяться через патрубок *13*. Вихідна сировина, кокс і розплав рухаються зверху донизу, а продукти горіння палива – димові гази – разом з летучими речовинами – знизу нагору, омиваючи і нагріваючи матеріал.

Нижня частина шахти, від підлоги до першого ряду фурм, називається *горном*. В ньому накопичується розплав, що остигає там до заданої в'язкості. В горні розплав повинен одержати визначені усереднені склад і температуру, а тому тривалість витримки його чітко фіксована. Звичайно висота горна складає 0,5...1 від його діаметра (практично 0,6...0,7).

В шахті при сталому режимі роботи умовно розрізняють чотири технологічні зони: I – сушіння, II – дегідратації і декарбонізації, III – плавлення сировини, IV – гомогенізації розплаву. Зона плавлення знаходиться над фурмами, тут згоряє паливо, підвищуючи температуру до 1600...1800°C. Розплав, що утворився, по розпеченому коксу стікає в горн, а продукти горіння палива спрямовуються нагору – у зону декарбонізації, де вони нагрівають верхні шари матеріалу до 800...900°C. У цій зоні глинисті компоненти сировини дегідратуються і розпадаються на первинні оксиди, а карбонатні компоненти розкладаються з виділенням CO<sub>2</sub>. Далі гази проходять зону підсушування, де підсушують і підігрівають до 100...120°C, свіжезавантажену сировинну суміш.

В якості палива використовують доменний або ливарний кокс. Останній більш продуктивний, оскільки має менші пористість і реакційну здатність (до 25 %), велику крупність шматків. Розмір шматків,



**Рис. 3.14.** Вагранка для отримання мінеральних розплавів

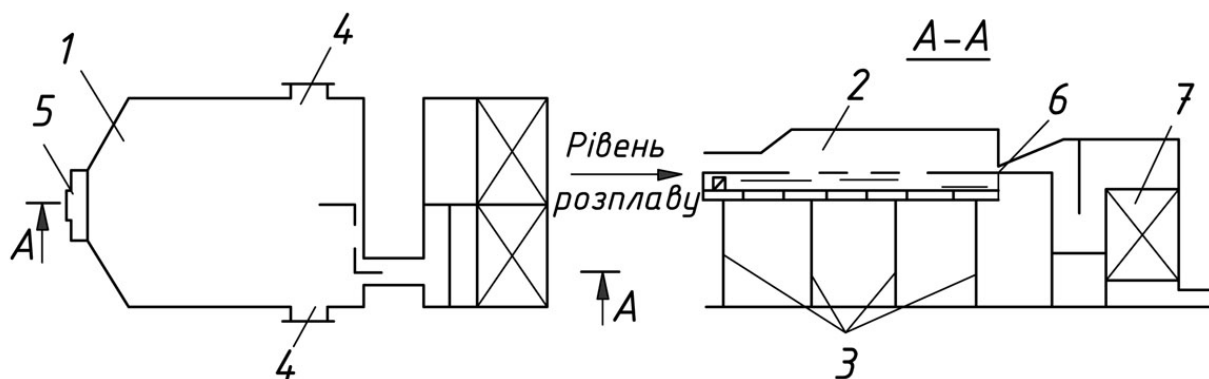


що рекомендується, для вагранок – 0,1 від діаметра вагранки, але не менше 40 мм.

Розміри вагранок, м: діаметр 1...1,4; висота досягає 20. Швидкість повітря в підвідному до колектора повітроводу 20...30 м/с, тиск перед фурмами 5...7 кПа. Питома продуктивність вагранки 1...1,25 т/(м<sup>2</sup>·год). Питома витрата умовного палива 150...350 кг/т розплаву. ККД вагранки 0,35...0,4.

**Ванні печі** класифікують за наступними параметрами: режимом роботи (періодичної і неперервної дії); напрямком руху полум'я (з по-здовжнім, поперечним або підковоподібним); способом нагрівання (полум'яні, електричні, полум'яно-електричні), а також із протитоко-вим і прямотоковим рухом газів і шихти.

*Регенеративна ванна піч* (рис. 3.15) з підковоподібним рухом по-лум'я являє собою робочу камеру у вигляді басейну 1, над яким роз-ташований полум'яний простір 2, перекритий склепінням. Склепіння має конфігурацію, що звужується, у напрямку виходу розплаву. Стіни басейну, склепіння печі і пальника ізолюють жаростійкими легкими бетонами, що скорочує витрату палива на 10...15 %. Підлогу басейну і склепіння полум'яного простору разом зі стінами спираються на мета-локонструкцію 3 (або безпосередньо на стіни басейну). Сировинну суміш (шихту) завантажують через завантажувальні канали (кишені) 4 в бічних стінах печей. Розплав, що утворився в басейні, стікає до пе-



**Рис. 3.15.** Схема регенеративної ванної печі

редньої торцевої стіні, де його відбирають через отвір 5. З нього він надходить у фідер – спеціальний канал для відбору провареного гото-вого розплаву і передачі його на переробний пристрій.

Паливо (газ або мазут) спалюють по черзі в двох пальниках 6, роз-ташованих біля задньої торцевої стіни печі. В них з регенератора 7 надходить нагріте повітря. Регенератор – це камера, заповнена насад-





кою вогнетривкої цегли. Кожна піч має дві камери із клапанами для перемінного переключення потоків газів печі, що відходять, і повітря, що підлягає нагріванню. Камери регенератора працюють циклічно.

Сировинна суміш погано проводить теплоту і тому протягом декількох секунд її поверхневий шар нагрівається до 1200...1400°C, утворюючи розплав, під яким знаходиться спечений шар. Розплав поступово стікає, оголюючи спечений шар, що при цьому плавиться. Одночасно нижній шар сировинної суміші нагрівається конвекційними потоками розплаву і також перетворюється в розплав. Середній шар сировинної суміші через низьку теплопровідність тривалий час залишається нерозплавленим, маючи температуру 200...300°C. У непроменепрозорих розплавах гірських порід теплообмін йде за рахунок теплопровідності і конвекції. Розплав у ванних печах безперервно рухається за рахунок завантаження сировинної суміші і безперервного відбору розплаву, різниці в густинах провареного і непровареного розплавів і наявності у ванні зон з різною температурою розплаву. Безперервний рух розплаву обумовлює конвективний теплообмін.

Ванні печі мінераловатного виробництва мають площу дзеркала печі 18...60 м<sup>2</sup>, продуктивність 12...60 т/добу. Питомий об'єм розплаву з 1 м<sup>2</sup> дзеркала печі складає 28...40 кг/(м<sup>2</sup>·год). Умовне теплове напруження дзеркала 105...145 кВт/м<sup>2</sup>. Питома витрата теплоти 11000...23000 кДж/кг. Однак у порівнянні з вагранками, ванні печі вимагають більших (в 4...5 разів) виробничих площ, вони більш капіталомісткі. Підготовка сировинної суміші для плавлення в таких печах вимагає великих енергетичних витрат. Тому при плавленні сумішей, що вимагають високих температур (наприклад, каолінової вати), перспективні електродугові і газоелектричні печі.



## Модуль 4. ТЕПЛОВА ОБРОБКА ВИРОБІВ З БЕТОНУ І ЗАЛІЗОБЕТОНУ

### 3.7. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТЕПЛОВУ ОБРОБКУ БЕТОНУ

#### *3.7.1. Поняття теплової і тепловологісної обробки. Фізико-хімічні процеси, що відбуваються в бетоні при ТВО*

**Теплова обробка** – найбільш розповсюджений і ефективний метод прискорення твердіння бетону.

Бетоном називають композиційний матеріал, що складається із цементного каменю, заповнювача і контактного шару між ними. Міцність бетону суттєво залежить від структури цементного каменю, що формується в процесі твердіння при обов'язковій наявності вологи.

Швидкість зростання структурної міцності бетону, як і швидкість будь-якої хімічної реакції, може бути різко збільшена із підвищенням температури середовища при тепловій обробці. Оскільки, при тепловій обробці можливе випаровування вологи з матеріалу, а її видалення припиняє процес гідратації цементу, то для проведення теплової обробки створюють умови, що дозволяють зберегти вологу в бетоні. Виходячи з цього, теплову обробку бетону з умовою збереження вологи в матеріалі називають **тепловологісною обробкою (ТВО)\***. Термін "**пропарювання**" використовують у випадках ТВО пароповітряною сумішшю (найбільш розповсюджений спосіб) або середовищі чистої насиченої пари.

Тепловологісна обробка бетонних і залізобетонних виробів є одним з найбільш тривалих і відповідальних процесів в технології їх виробництва. Кінцевою метою теплової обробки в більшості випадків є отримання не повної проектної міцності бетону, а лише її частки, як правило, 70% проектної. Це дає можливість виконувати подальші виробничі операції (розпалублення, передачу зусилля арматури на бетон, транспортування, монтаж тощо).

Як було зазначено вище, підвищення температури приводить до прискорення реакції гідратації цементу – підвищення з 20°C до 60...100°C приводить до прискорення реакції в 6...12 разів. При цьо-

---

\* При подальшому викладенні матеріалу даного модуля будуть використовуватись терміни як "теплова", так і "тепловологісна" обробка, які в даному контексті можна вважати синонімами.



му для забезпечення збереження води в бетоні у рідкій фазі, підвищення температури відбувається в умовах високої вологості середовища ( $\phi \sim 100\%$ ) або в умовах, що виключають масообмін між виробом і середовищем.

При прогріванні щойно відформованого бетону в ньому одночасно протікають *конструктивні процеси (структуроутворення)*, обумовлені прискоренням твердіння цементу і зміцненням структури бетону, і *деструктивні процеси*, що виникають в результаті фізичних змін під дією температурних і вологісних факторів. До них відносяться явища, викликані температурними, лінійними й об'ємними змінами, внутрішніми деформаціями, капілярним тиском і міграцією вологи. Необхідною умовою зростання міцності бетону при його твердінні є переважання структуроутворюючих процесів над деструктивними.

При тепловологісній обробці бетону вода і "затиснене" повітря, що знаходяться в ньому і мають коефіцієнти температурного розширення в 20...300 разів вище, ніж у заповнювачів і новоутворень, розсувають тверді компоненти, створюючи внутрішній тиск, який перевищує міцність відформованого бетону. При цьому спостерігаються необоротні порушення структури бетону, такі як зменшення міцності, поява мікротріщин і капілярних каналів.

Нерівномірності розподілу температур по об'єму виробу, що виникають в процесі нагрівання викликають нерівномірні температурні розширення різних ділянок і зон виробу, температурні напруження і деформації.

Процеси масообміну, якими супроводжується теплова обробка бетону (наприклад конденсація пари на поверхні виробів, випаровування вологи з відкритих поверхонь, міграція вологи пари і повітря всередині бетону), також впливають на характер і розвиток деструктивних процесів. В залежності від ступеня температурного впливу і впливу деструктивних процесів порушення структури бетону в порівнянні з бетоном нормального твердіння характеризується погіршенням його основних фізико-механічних властивостей (міцності, довговічності, морозостійкості).

### **3.7.2. Способи теплової обробки бетону**

Теплову обробку бетону можна здійснювати парою, електрикою, високотемпературними теплоносіями, а також комбінованими способами. Класифікація способів теплової обробки бетону наведена на рис. 3.16.

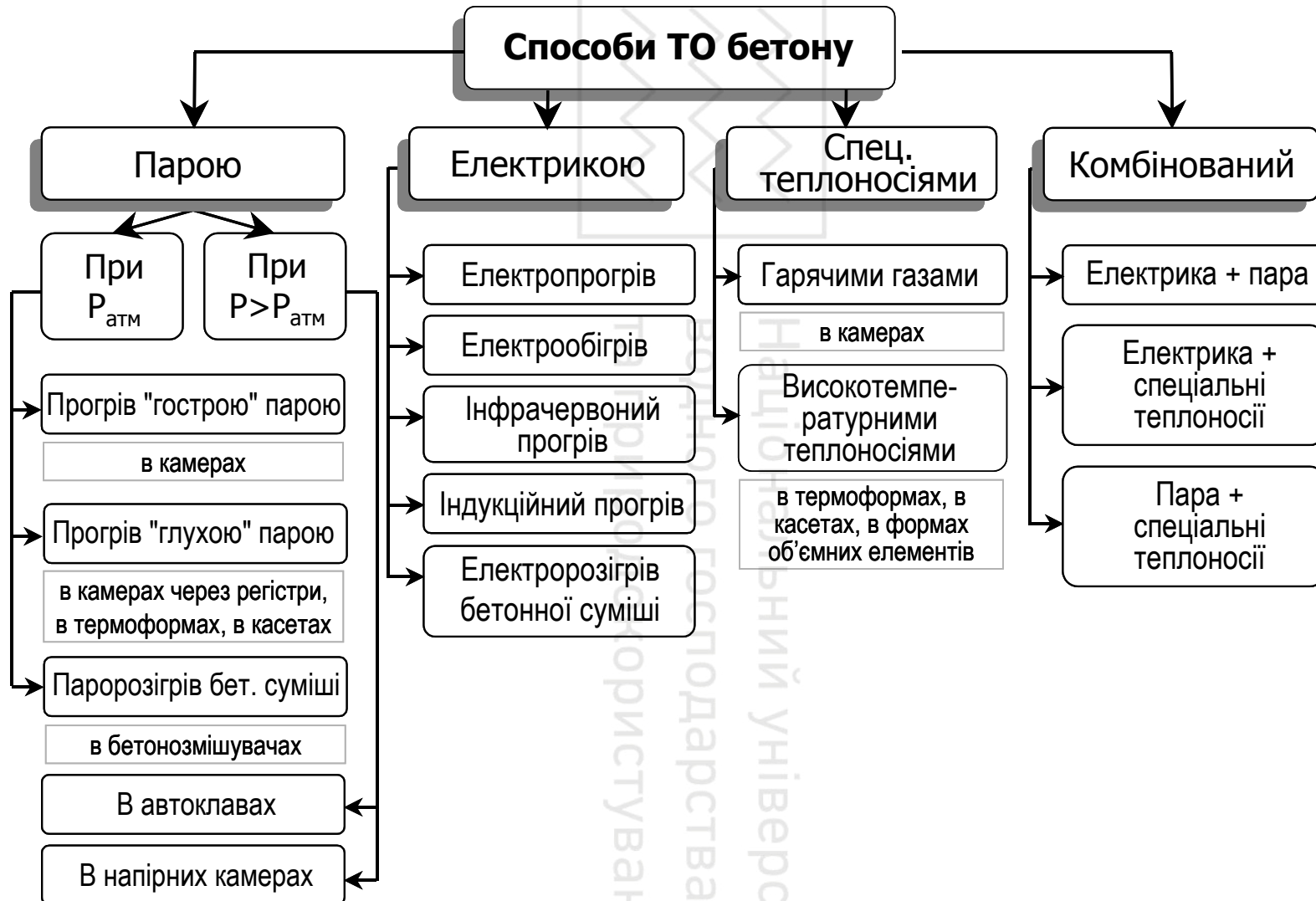


Рис. 3.16. Класифікація способів теплової обробки бетону



У виробничих умовах для теплової обробки залізобетонних виробів широко використовується пара і рідше електрика.

Можуть також використовуватись відхідні димові гази теплових установок, гаряче повітря, рідкі теплоносії (органічні і неорганічні оливи, наприклад, петролатум), що дозволяють одержати при атмосферному тиску температуру від 100 до 150°C. Гарячими газами прогрівають вироби як у відкритих, так і в замкнутих формах типу касет; гарячими рідинами – тільки в замкнутих формах.

Комбіновані способи теплової обробки дозволяють одержати найбільш вигідні співвідношення між технологічними, організаційними й економічними параметрами виробництва бетонних і залізобетонних виробів за умови механізації перевантажувальних робіт з мінімальними тепловтратами. З комбінованих способів найбільш розповсюджений попередній розігрів бетонної суміші з наступним, паропрогрівом, прогрівом гарячим повітрям або електрообігріванням.

**Прогрівання бетону при атмосферному тиску** при безпосередньому зіткненні теплоносія із матеріалом проводять гарячим повітрям, пароповітряною сумішшю або продуктами згоряння газу в ямних камерах, пропарювальних стендах, тунельних, щілинних і вертикальних камерах безперервної дії, прокатних станах. Цей спосіб теплової обробки одержав широке поширення завдяки порівняно простій системі теплопостачання і низькій металоемності. Проте даний спосіб може негативно позначатися на якісних характеристиках поверхневого шару бетону або всього виробу.

**Теплова обробка в середовищі з надлишковим тиском** здійснюється в малонапірних пропарювальних камерах або автоклавних установках в середовищі чистої насиченої пари, що сприяє покращенню фізико-механічних властивостей твердіючого бетону, скороченню тривалості теплової обробки і зменшенню витрати в'язучого.

**Теплова обробка в рідкому середовищі** здійснюється з метою зменшення шкідливого впливу процесів масообміну, зниження пористості цементного каменю, підвищення поверхневої міцності бетону (обробка у воді) або надання йому гідрофобних властивостей (обробка в оліві, петролатумі). При гідробаротермальній обробці вироби, що мають початкову структурну міцність, поміщають у камеру, заповнену водою, і герметизують її. Тиск, що виникає при підігріванні води, і теплове гідравлічне обтискання бетону приводять до ущільнення його структури і підвищенню якісних характеристик. В масляному середовищі обробляють шпали, палі, вироби для гідротехнічних і підземних





споруд. Так, 6-годинна теплова обробка в петролатумі дозволяє бетону набрати марочну міцність у добовому віці із глибиною просочення 5 мм.

**Контактне нагрівання** виробів (через роздільну металеву стінку) здійснюють в індивідуальних термоформах або пакетах термоформ, що складаються пакетувальниками конвеєрних ліній, а також у вертикальних термоформах касетних установок або формувальних установках при виготовленні просторових блоків. Цей спосіб характеризується високою якістю поверхні виробів в поєднанні з прискореним нагріванням (60...70°C/год) за рахунок обмеження температурних деформацій поверхневих шарів бетону і виключення шкідливого впливу поверхневого масообміну. При контактному нагріванні виробів можливе застосування технологічних прийомів, що збільшують оборотність установок (наприклад, попередній розігрів форм і бетону, двостадійна обробка).

Для інтенсифікації процесу тепловіддачі від теплоносія до бетону і рівномірного розподілу температури в теплових відсіках застосовують примусову циркуляцію пароповітряної суміші в установці за допомогою ежекторів або інтенсивну циркуляцію безпосередньо у відсіку за рахунок швидкісної струминної подачі пари (через сопла).

**Термообробку бетону з використанням електричної енергії** виконують наступними основними методами: електродним прогріванням, електрообігріванням і нагріванням в електромагнітному полі.

*Електродне (наскрізне) прогрівання* здійснюється шляхом пропускання струму крізь бетон збірних і монолітних бетонних і малоармованих залізобетонних виробів і конструкцій. Застосування його найбільш ефективно для фундаментних блоків, а також колон, стін і перегородок товщиною до 50 см.

*Електрообігрівання* збірних виробів здійснюють за допомогою вмонтованих в опалубку твердих електронагрівників. При цьому опалубка повинна мати теплоізоляцію із зовнішньої сторони.

Нагрівання бетону в *електромагнітному полі (індукційний)* застосовують для збірних виробів лінійного типу з рівномірно розподіленою по перерізу арматурою шляхом влаштування індуктора навколо елемента. Електропрогрівання у камерах з випромінюючими поверхнями застосовують переважно при виготовленні плит перекриттів, панелей, стін.





*Обігрівання інфрачервоними променями застосовують у камерах безперервної дії щілинного типу з використанням трубчастих металевих випромінювачів.*

*Більш детально особливості термообробки з використанням електричної енергії наведені в п. 3.14.*

Вибір способу та установок для теплової обробки визначається рядом факторів: способом виробництва збірного залізобетону (стендовий, агрегатно-поточковий, конвеєрний), характеристикою виробів, що виготовляються, (габарити, маса, серійність), видом і структурою бетонів (важкий або легкий бетон, щільний або ніздрюватий), складом в'язучих (мінералогічний склад клінкера, речовинний склад цементу) та ін. Наприклад, на стендах і в нерухомих формах виготовляють конструкції, що технічно й економічно недоцільно виготовляти на поточкових лініях: балки прольотом 12...18 м, ферми, підкроквяні ферми, колони тощо. При конвеєрному способі виробництва доцільний випуск однотипної продукції, наприклад, зовнішніх або внутрішніх стінових панелей житлових будинків; по продуктивності лінії, габаритам продукції, що випускається, підбирають габарити теплових агрегатів, а по виду, структурі бетону, складові в'язучого – спосіб теплової обробки.

Вибір технології виготовлення і способів теплової обробки виробів здійснюється *на основі порівняння варіантів*. З конкурентоздатних варіантів, що забезпечують якісний випуск продукції, вибирається той, що вимагає мінімум приведених витрат на виготовлення виробів в даних умовах виробництва.

### **3.8. ЕКЗОТЕРМІЯ БЕТОНУ**

Твердіння бетону – заключний етап виготовлення штучного каменю капілярно-пористої структури з в'язучого, крупного і дрібного заповнювача і води. При замішуванні суміші водою в'язуче вступає в хімічні реакції гідратації, проходячи послідовно стадії формування просторового каркаса колоїдної структури, індукційного періоду, формування, а потім зміцнення конденсаційно-кристалізаційної структури.

Гідратація цементу відноситься до хімічних реакцій, що проходять з *екзотермічним ефектом*, тобто з виділенням теплоти. Тепловиділення цементів залежить від мінералогічного складу і активності в'я-



жучого, тонкості помелу, водоцементного відношення, умов і тривалості твердіння.

Термохімічні властивості мінералів в'язучого різні; найбільшу екзотермію має трикальцієвий алюмінат, найменшу – двокальцієвий силікат. Орієнтовно тепловиділення 1 кг цементу після 28-днів твердіння в природних умовах, кДж/кг, може бути прийняте як

$$Q_e = 0,8...1,0 \cdot M; \quad (3.21)$$

де  $M$  – марка цементу.

Для шлаколузких в'язучих тепловиділення залежить від виду шлаку, його модуля основності, виду і густини лужного компонента і складає  $Q_e = 0,3...0,5 \cdot M$ .

При гідратації цементу в процесі тепловологісної обробки тепловиділення на кожному етапі залежить від середньої температури бетону і тривалості процесу, що при постійному водоцементному відношенні можна представити як функцію градусо-годин:

$$Q_E = f(\theta); \quad \theta = t_6 \cdot \tau_i; \quad (3.22)$$

$$\theta = 0,5 \cdot (t_1 + t_2) \tau_I + t_2 \tau_{II} + 0,5 \cdot (t_2 + t_3) \tau_{III}, \quad (3.23)$$

де  $t_6$  – середня температура бетону;  $t_1, \tau_I; t_2, \tau_{II}; t_3, \tau_{III}$  – відповідно температура бетону і тривалість періоду нагрівання, ізотермічного витримання та охолодження. Середню температуру бетону визначають з розрахунків нестационарних температурних полів.

Для практичних розрахунків застосовують номограму для визначення тепловиділення бетону (рис. 3.17), що пов'язує марку цементу, водо-цементне відношення і кількість градусо-годин.

Найбільше тепловиділення цементу спостерігається в перші періоди твердіння, потім процес сповільнюється; тепловиділення більш ефективне (при однаковій кількості градусо-годин) при короткому нагріванні до високої температури, ніж тривале твердіння при невисоких температурах. Так, якщо в  $1 \text{ м}^3$  бетону міститься цементу  $\text{Ц}$ , кг, то тепловиділення бетону  $Q_{Еб} = q_{екз} \cdot \text{Ц}$ , кДж/м<sup>3</sup>. Ця теплота може складати до 20% всієї теплоти, що витрачається на нагрівання виробів, і повинна враховуватися при складанні теплового балансу процесу. При відсутності втрат теплоти в навколишнє середовище і на випаровування температура в бетоні може на  $5...10^\circ\text{C}$  перевищити температуру середовища в установці, що небажано, зокрема, для попередньо напружених бетонів.

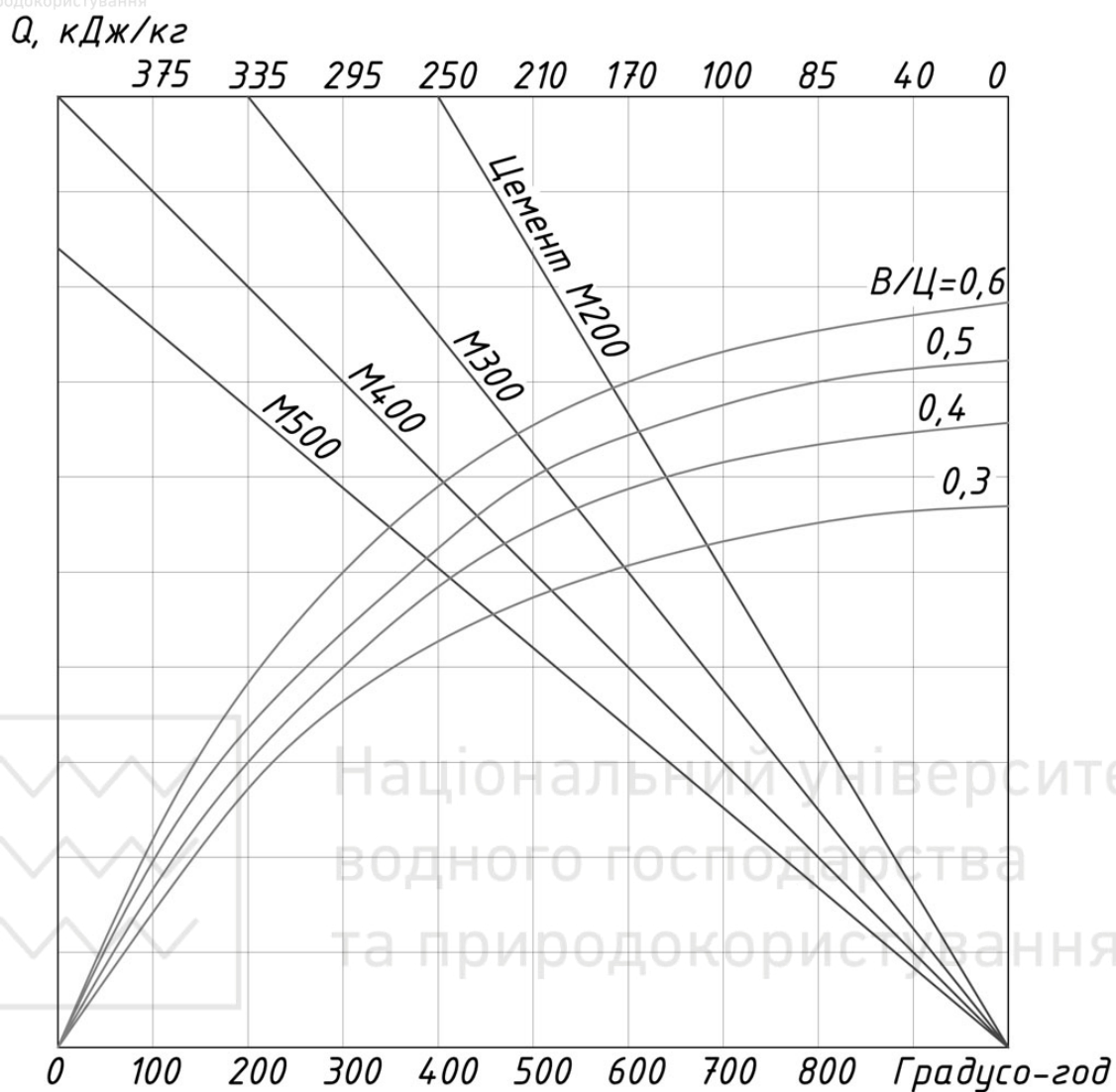


Рис. 3.17. Номограма для визначення екзотермії бетону, виготовленого на портландцементі при ТВО

Приклад розрахунку екзотермії бетону під час тепловологісної обробки наведено в розділі 4, приклад 15.

### 3.9. ТЕПЛО- І МАСООБМІН ПРИ ТЕПЛОВОЛОГІСНІЙ ОБРОБЦІ

Теплові способи прискорення твердіння бетону засновані на нагріванні матеріалу виробу за рахунок передачі теплоти від певного джерела або теплоносія. Передача теплоти до виробу (зовнішній теплообмін) може здійснюватися *конвективно* з використанням в якості теплоносія водяної пари, повітря, пароповітряної суміші, продуктів згоряння газу, *кондуктивно* (в результаті теплопровідності), а також за допомогою *випромінювання*.



Зміна умов і параметрів середовища в установці, а відтак і параметрів поверхні виробів приводить до зміни температурного поля всередині виробу і переміщення вологи і повітря (маси). Інтенсивність внутрішнього тепло- і масообміну впливає на формування структури матеріалу, кінцеві міцнісні та експлуатаційні характеристики виробу.

Прогрівання за допомогою конвективного теплообміну відбувається в тепловологісних установках, в яких теплоносій безпосередньо стикається з поверхнею виробу (ямні, щілинні, тунельні, вертикальні камери), а також у відсіках термоформ касет, пакетувальників, об'ємно-формувальних установок. Теплообмін залежить від швидкості і характеру руху теплоносія (природна конвекція або вимушений рух), і його властивостей (густини, в'язкості, теплоємності). При нагріванні виробів у конвективному потоці теплоносія, що не конденсується (сухе нагріте повітря, продукти згоряння газу), коефіцієнт конвективного теплообміну  $\alpha_k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°C), може бути визначений (за А. Вознесенським) з формул:

$$Nu = 0,035Pr^{0.33}Re^{0.8}; \quad (3.24)$$

$$\alpha_k = (4,55 + t/600)(\rho v_0)^{0.8}/l^{0.2}, \quad (3.25)$$

де  $Nu$ ,  $Pr$ ,  $Re$  – відповідно критерії Нусельта, Прандтля, Рейнольдса;  $t$ ,  $\rho$ ,  $v$  – відповідно температура, густина і швидкість руху теплоносія;  $l$  – характерний лінійний розмір виробу (товщина, діаметр).

Однак застосування цих теплоносіїв приводить, як правило, до зневоднення поверхневих шарів бетону, що знижує якість виробів. Зазначені теплоносії можна застосовувати із деякими застереженнями для легких бетонів низьких марок.

Повітря має хороші теплоізоляційні властивості: коефіцієнт його теплопровідності складає  $\lambda=0,0245$  Вт/(м·°C). Тому повітряний прошарок, що створюється навколо виробів, значно знижує теплообмін. При цьому коефіцієнт тепловіддачі повітря поверхні, що нагрівається, дуже низький і складає 5...12 Вт/(м<sup>2</sup>·°C). При відсутності в установці циркуляції повітря застоюється між плоскими виробами в щілинах і порожнинах, тому до значної частини поверхні виробів немає підведення теплоти. Нерівномірність прогріву, що виникає при цьому приводить до напружень, деформацій і тріщин.

Для збереження вологи в матеріалі теплову обробку бетону проводять *насиченою водяною парою*, що при зіткненні з більш холодною поверхнею виробу конденсується, віддаючи при цьому теплоту



2200...2500 кДж/кг. На поверхні виробу утворюється плівка конденсату, що знижує коефіцієнт теплообміну і питомий потік теплоти до виробу.

Коефіцієнт тепловіддачі насиченої водяної пари складає 10000...12000 Вт/(м<sup>2</sup>·°C), однак присутність повітря й утворення пароповітряної суміші різко знижує ці значення. Так, 1% повітря в суміші знижує теплообмін більш ніж удвічі.

При подачі пари в установку, що працює при атмосферному тиску, пара попадає в повітряне середовище і змішується з повітрям у невідношенні і постійно мінливому співвідношенні. Пароповітряна суміш біля поверхні виробу розшаровується, пара конденсується і її парціальний тиск біля поверхні падає, а парціальний тиск повітря зростає. На поверхні виникає термічний опір плівки води (коефіцієнт теплопровідності  $\lambda=0,68$  Вт/(м·°C)), біля поверхні – термічний опір шару повітря.

Таким чином, навіть при наявності пари в установці теплообмін між середовищем і виробом може різко знизитися. Коефіцієнт теплообміну від пароповітряного середовища до виробу залежить від багатьох факторів, і насамперед від співвідношення пари і повітря в пароповітряній суміші, а також швидкості руху пароповітряної суміші.

Коефіцієнт теплообміну в установках для тепловологісної обробки залежить від інтенсивності конвективного теплообміну, кількості пари, що конденсується, виду конденсації (плівкова або крапельна), розташування і конфігурації поверхонь.

Коефіцієнт теплообміну при конденсації, Вт/(м<sup>2</sup>·°C), можна визначити за формулою:

$$\alpha = \alpha_k + \frac{0,278rq_k}{t_c - t_n}, \quad (3.26)$$

де  $q_k$  – кількість пари, що конденсується на поверхні виробів, кг/(м<sup>2</sup>·год);  $\alpha_k$  – коефіцієнт конвективного теплообміну;  $r$  – питома теплота пароутворення, кДж/кг.

Різні теплоносії мають наступні коефіцієнти тепловіддачі  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°C):

Гази при природній конвекції	5...30
» » вимушеному русі	10... 100
Вода при природній конвекції	100... 1000
» » вимушеному русі	500... 10 000
Кипляча вода	2000... 10 000
Водяна пара, що конденсується	4000... 15000





Конденсація може бути плівковою, коли рідка фаза, що конденсується, розподіляється по поверхні виробів у вигляді суцільної стійкої плівки, і крапельною, коли поверхня покривається краплями. В останньому випадку тепловіддача в 5...10 разів більша.

Коефіцієнт теплообміну між, чистою насиченою паром і вертикально розташованими поверхнями конденсації, Вт/(м<sup>2</sup>·°C):

$$\alpha = \frac{6730 + 27 \cdot (t_c - t_n)}{\sqrt[4]{h \cdot (t_c - t_n)}}, \quad (3.27)$$

а при горизонтальному розташуванні поверхонь:

$$\alpha = \frac{5170 + 20,5 \cdot (t_c - t_n)}{\sqrt[4]{h \cdot (t_c - t_n)}}, \quad (3.28)$$

де  $h$  – вертикальний розмір стінки;  $t_c$  і  $t_n$  – температура відповідно середовища і поверхні тіла, що нагрівається, °C.

При збільшенні швидкості руху пароповітряного середовища вплив домішок повітря значно знижується, а швидкість теплообміну підвищується, тобто коефіцієнт  $\alpha$  підвищується при збільшенні швидкості суміші, температури і відносної вологості середовища.

Конденсація пари, що підсилюється при збільшенні відносної вологості і наближенні  $\phi$  до 100%, відбувається протягом періоду нагрівання і початкового етапу ізотермічного витримання. При цьому матеріал всмоктує вологу, змінюючи водоцементне відношення поверхневих шарів бетону. Кількість вологи, поглиненої матеріалом у період нагрівання може складати 2...3 % від кількості води замішування.

Вплив зовнішніх умов середовища в тепловій установці в усі періоди обробки виробів позначається на зміні температури і вологовмісту поверхні матеріалу, що у свою чергу викликає переміщення теплоти і маси в об'ємі виробу.

Внаслідок теплової інерційності бетону створюється перепад і градієнт температур поверхня – центр, а тепловий потік починає рухатися в зону знижених температур.

Теплота усередині вологого виробу передається як за рахунок теплопровідності, так і потоком теплоти, що несе потік вологи (маси), що переміщується в матеріалі.

Питомий потік теплоти всередині вологого матеріалу визначається за виразом:



$$q^B = -\lambda \text{ grad } T + i \cdot q_m^B, \quad (3.29)$$

де  $\lambda$  – теплопровідність вологого матеріалу;  $\text{grad } T$  – градієнт температури;  $i$  – теплота, що передається в матеріалі з питомим потоком маси;  $q_m^B$  – густина питомого потоку маси.

Оскільки при підвищенні температури збільшується внутрішнє тепловиділення, то розподіл температурного поля у виробі залежить не тільки від поверхні теплового впливу але і екзотермії в'язучого.

В період нагрівання під дією градієнта вологовмісту з'являється потік вологи, спрямований від поверхні матеріалу до центра виробу, що посилюється потоком вологи, викликаним термовологопровідністю за рахунок градієнта потенціалу переносу теплоти.

При виникненні градієнта тиску густину потоку маси у виробі можна представити у вигляді

$$q_m^B = -a_m \rho_o \cdot (\text{grad } u \pm \delta \text{ grad } T \pm \delta_p \text{ grad } p), \quad (3.30)$$

де  $q_m^B$  – густина потоку маси, що переміщується всередині матеріалу за одиницю часу через одиницю поверхні;  $a_m$  – коефіцієнт потенціалопровідності, що визначає швидкість переміщення вологи під дією теплового потоку (термовологопровідність);  $a_m = \lambda_m / (c_m \cdot \rho_o)$  – за фізичним змістом аналог температуропровідності;  $\rho_o$  – середня густина сухого матеріалу;  $\delta$  – термоградієнтний коефіцієнт, що враховує вплив на коефіцієнт потенціалопровідності  $a_m$  відношення перепаду вологовмісту до перепаду температур;  $\delta_p$  – коефіцієнт, що враховує вплив на  $a_m$  відношення зміни масопереносу до перепаду тиску;  $\text{grad } u$ ,  $\text{grad } T$ ,  $\text{grad } p$  – відповідно градієнти вологовмісту, температури і тиску.

Виникаючий надлишковий тиск передається на бетон, впливаючи на процеси структуроутворення. Тиск у бетоні нерівномірний: максимальний – у внутрішніх шарах, мінімальний – біля поверхні. Перепади тиску впливають на різні шари матеріалу; так з'являються дотичні напруження, що прагнуть зрушити їх стосовно один одного і здатні порушити або навіть зруйнувати структуру матеріалу.

Значні напруження виникають в матеріалі через фізичні зміни матеріалу при нагріванні. Бетонна суміш – це конгломерат, який складається з матеріалів, що мають різні коефіцієнти температурного розширення. Нерівномірне розширення складових бетонної суміші при нагріванні співпадає з формуванням структури матеріалу і може привести до її порушень. Напруження в матеріалі також виникають через нерівномірність температурного поля: розігріті поверхневі шари за-



знають напружень стиску, центральні – розтягу. Зміна вологовмісту по перерізу матеріалу приводить до того, що при збільшенні кількості вологи складові матеріалу розсовуються і матеріал набухає, збільшуючись в розмірах. Зі зменшенням вологовмісту частинки матеріалу зближуються, матеріал дає усадку; при цьому поверхневі шари також зазнають напружень стиску, а центральні – розтягу.

Якщо сумарні розтягуючі і стискаючі напруження, викликані градієнтами температури, вологовмісту і тиску перевищать значення, допустимі для даного матеріалу на даному етапі формування структури, то виникають деформації і порушення структури (*деструкція*). Найбільш небезпечним у цьому відношенні є початкові етапи тепловологісної обробки, оскільки потім бетон постійно набирає міцність і здатний витримувати все більш значні напруження.

В період ізотермічного витримування спостерігається вирівнювання температур у середовищі і матеріалі, а температурні градієнти зменшуються і зникають. Потім під впливом екзотермії температура внутрішніх шарів підвищується; з'являються незначні градієнти, направлені в зворотну сторону; теплота і волога починають переміщуватися до поверхні.

В період ізотермічного витримування бетон втрачає до 15 % води замішування. Цей процес особливо підсилюється в період охолодження, коли замість пари в установку подають повітря, що охолоджує поверхню виробу і поглинає вологу. Розподіл температур і вологовмісту змінюється, знову виникають стискаючі і розтягуючі напруження, але вже із зворотним знаком.

При прогріванні виробів через металеву поверхню (термоформу) динаміка температурних і вологісних полів залежить від температури поверхні і величини відкритої поверхні виробу.

Температура нагрівальної поверхні залежить від виду і параметрів теплоносія, з яких найбільш поширені водяна пара і вода. При застосуванні пари підвищення температури понад 100°C приводить до підвищення тиску. Залежність тиску і температури визначають за лінією насиченої пари (табл. 3.1).

Оскільки для виготовлення більшості бетонних виробів застосовують плоскі форми, то підвищення температури і тиску викликає необхідність значно зміцнювати конструкції, підвищуючи металоємність форм. Підвищення температури теплоносія без підвищення тиску можливе при застосуванні високотемпературних теплоносіїв, що мають значно більш високу температуру кипіння. Температури 200...250°C



можуть бути створені у відсіках термоформ при використанні мінеральних олив, дитолілметану та інших теплоносіїв з температурою кипіння 250...300°C.

Таблиця 3.1

Параметри насиченої водяної пари в залежності від температури

Температура насичення $t$ , °C	Тиск $P$ , кПа	Ентальпія $i_{п}$ , кДж/кг	Теплота пароутворення $r$ , кДж/кг
100	101,325	2676	2257
120	198,54	2707	2203
140	361,36	2734	2145
160	618,04	2758	2082
180	1002,7	2777	2014
200	1555,1	2791	1939
250	3980	2801	1715
300	8590	2749	1404

При прогріванні виробів через вертикальні поверхні з великою площею прогріву необхідно забезпечити інтенсивний рух теплоносія, оскільки при низьких швидкостях можливі застійні зони, а також розшарування по висоті: зверху проходить теплоносій з високою температурою, що забезпечує інтенсивний теплообмін, знизу – охолоджений, який має температуру, близьку до температури бетону. Нерівномірність прогрівання виробу може привести до появи тріщин.

Якщо виріб прогрівається у твердій сталевій формі, закритій з усіх боків, то конструкція форми приймає на себе розтягуюче напруження зовнішніх шарів бетону, стримує деформації, ущільнює та зміцнює виріб. При нагріванні максимальна температура створюється біля нагрівальних стінок, а максимум вологовмісту – в центральних шарах матеріалу. Якщо форма має відкриту поверхню, то нагрівання через стінку створює рух потоків вологи до більш холодної відкритої поверхні. Чим менший діаметр капілярів в матеріалі, тим більш низьку температуру кипіння має волога в порівнянні з температурою кипіння на відкритій поверхні; закипання вологи може порушити структуру матеріалу.

При обробці виробів у продуктах згоряння газу прогрівання відбувається за допомогою конвективного теплообміну. Найважливішим показником для визначення параметрів продуктів згоряння природного газу як теплоносія є коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ , що показує



відношення кількості повітря, що подається в топку, до кількості повітря, необхідного для горіння.

На стадії нагрівання та ізотермічного витримування при температурі середовища до 100...120°C протягом 0,5...1,5 год. відбувається конденсація пари на поверхні виробу із середовища продуктів згоряння. Процес продовжується доти, поки температура поверхні виробів буде нижче точки насичення (точки роси) продуктів згоряння.

По мірі розігріву поверхні інтенсивність конденсації знижується і настає рівноважний стан, а потім починається випаровування вологи з бетону.

При конденсації пари на поверхні виробів і підвищенні температури середовища відносна вологість на початку зменшується, потім у зв'язку з випаровуванням вологи з поверхні зростає до 40 % і залишається постійною до закінчення активного періоду теплової обробки, тобто до вимикання пальника теплогенератора. Протягом періоду нагрівання й ізотермічного витримування при температурі 80...100°C втрати води замішування з важкого бетону в рециркуляційних установках при  $\alpha = 2...2,2$  і коефіцієнті заповнення камери 0,1...0,2 складають 2...2,5% за масою. При тепловій обробці легких бетонів і підвищенні температури середовища в камері втрати води замішування значно збільшуються.

Зневоднення зовнішніх шарів бетонних виробів може негативно вплинути на конструктивні й експлуатаційні якості бетонних виробів. Однак деструктивні процеси в бетоні при тепловій обробці можуть бути зведені до мінімуму призначенням правильного режиму обробки.

## 3.10. РЕЖИМИ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ

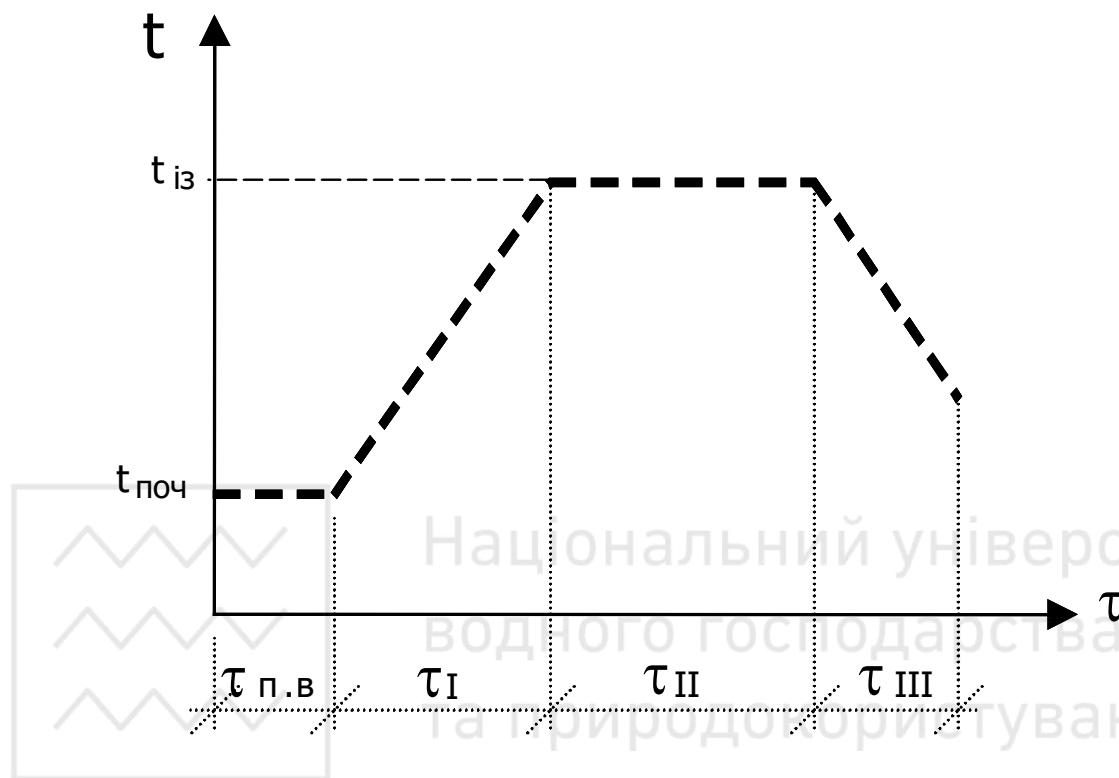
### 3.10.1. *Поняття режиму тепловологісної обробки*

*Режимом тепловологісної обробки* називається сукупність умов навколишнього середовища (температура, вологість і тиск), що діють на виріб протягом певного часу і обумовлюють оптимальну для даного виробу швидкість процесу твердіння.

*Ефективними* вважаються такі режими теплової обробки, що дозволяють одержувати бетон заданої міцності без істотних порушень його структури при мінімальних питомих витратах в'язучого і теплової енергії.



В загальному вигляді *повний цикл тепловологісної обробки* бетонних і залізобетонних виробів складається з наступних періодів (рис. 3.18\*): попереднього витримування  $\tau_{п.в}$ ; нагрівання виробу  $\tau_I$ ; ізотермічного витримування  $\tau_{II}$ ; охолодження  $\tau_{III}$ .



**Рис. 3.18.** Типовий режим теплової обробки бетону

Режим теплової обробки включає в себе параметри періодів нагрівання, ізотермічного прогріву (при максимальній температурі) і охолодження. Він характеризується тривалістю кожного періоду ( $\tau$ ), максимальною температурою ізотермічного прогріву ( $t_{із}$ ) і вологістю середовища. Режими можуть бути жорсткими і м'якими.

*Жорстким режимам* відповідають жорсткі умови структуроутворення бетону: коротке попереднє витримування щойно відформованих виробів, швидкий підйом температури, висока температура ізотермічного прогріву, недостатньо вологе середовище, негайна розпалубка і т.ін.

*М'які режими* поєднують тривале попереднє витримування, повільний підйом температури, низьку температуру ізотермічного прогріву, вологе середовище і т.ін.

\* Інші види режимів див. на рис. 7.1.



### **3.10.2. Фактори, що визначають раціональні режими теплової обробки**

Вибір раціональних режимів теплової обробки ґрунтується на оптимальному поєднанні безлічі технологічних і теплотехнічних факторів. Тривалість попереднього витримування, швидкість нагрівання, температура і тривалість ізотермічного витримування і т.д. залежать від характеристик матеріалу, умов експлуатації виробу, конструкцій теплових установок.

**Вид в'язучого.** Теплова обробка по-різному впливає на інтенсивність твердіння і кінцеву міцність різних видів в'язучих, яким відповідають визначені режими теплової обробки. Ефективність режиму оцінюють по витраті в'язучого, відносної й абсолютної міцності бетону і часу, протягом якого цю міцність можна одержати. В'язуче, яке при найменшій витраті забезпечує максимальну міцність бетону в мінімально короткий термін теплової обробки, вважається найбільш ефективним.

Теплова обробка доцільна для портландцементів і шлакопортландцементів. Пуцоланові портландцементи і їх різновиди при тепловій обробці застосовують тільки для виробів спеціального призначення, що повинні мати підвищену водо- і солестійкість. Теплова обробка виробів із пластифікованих і гідрофобних цементів допускається при призначенні спеціальних режимів із тривалим попереднім витримуванням або повільною швидкістю підйому температури. Для цементів, що містять 30...50% тонкомолотих кремнеземистих компонентів (кварцовий пісок і т.п.), теплову обробку треба проводити при підвищеному тиску. Глиноземисті цементи піддавати тепловій обробці забороняється.

**Водоцементне відношення бетонної суміші.** Ефективність теплової обробки знижується в міру збільшення водоцементного відношення (В/Ц) бетонної суміші. Рухливі бетонні суміші в порівнянні з жорсткими містять більшу кількість вільної води, що приводить до підвищеної пористості бетону. Чим більше В/Ц (при інших постійних параметрах), тим повільніше росте міцність бетону і менша її кінцева величина.

У свіжовідформованому стані виробу з жорстких бетонних сумішей мають більшу міцність, ніж з рухливих, тому при тепловій обробці структура їх порушується менше. Відтак, при одному і тому ж В/Ц



жорсткі бетонні суміші забезпечують більшу відносну міцність і значно менше реагують на зміну параметрів теплової обробки, ніж рухливі.

**Масивність виробів.** В залежності від швидкості підігріву температурний перепад у масивних виробках (товщиною понад 15 см) досягає 35...60°C, а в немасивних, тонкостінних (товщиною до 15 см) – не перевищує 10...15°C. Чим масивніший виріб, тим більша різниця температур між зовнішніми і внутрішніми шарами бетону і тем більша величина температурних напружень. В результаті підвищується ймовірність виникнення тріщин і порушення структури бетону. Щоб уникнути цього (при всіх інших постійних параметрах) масивні вироби нагрівають значно повільніше, ніж тонкостінні.

**Вид бетону.** Коефіцієнт теплопровідності легкого бетону в 4...5 разів менший ніж у важкого (табл. 3.2). У зв'язку з тим, що легкий бетон повільно нагрівається і охолоджується, його тепла обробка повинна бути досить тривалою. Однак у ряді випадків ізотермічний прогрів не потрібний: легкий бетон досить підігріти тільки до максимальної температури.

Таблиця 3.2

Теплофізичні характеристики різних видів бетонів

Матеріал	Середня густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коефіцієнт		
		теплопровідності $\lambda$ , Вт/(м·°C)	теплоємності $c$ , кДж/(кг·°C)	температуро-провідності $a$ , м <sup>2</sup> /(год·10 <sup>-4</sup> )
Залізобетон	2400	1,56	0,84	27,9
Бетон: з кам'яним щебенем крупнопористий	2400	1,45	0,84	25,8
	1900	0,99	0,84	22,3
Шлакобетон на порт- ландцементі	1900	0,95	0,83	19,2
	1500	0,70	0,80	20,9
Керамзитобетон	1500	0,45	0,84	15,0
	1200	0,31	0,82	11,5
	900	0,22	0,80	9,6
Силікатобетон	1900	0,64	0,84	14,9
	1700	0,59	0,83	14,7
	1400	0,38	0,73	13,3
Газобетон	950	0,25	0,82	13,3
	400	0,14	0,80	10,9

Ефективність теплової обробки виробів з легкого бетону підвищується в міру зниження його середньої густини і міцності. Чим нижча необхідна марка бетону, тим швидше вона досягається. Навіть при



короткому режимі прогріву цементний камінь набирає міцність, що перевищує міцність легкого пористого заповнювача.

При призначенні режиму теплової обробки легкого бетону необхідно враховувати такі фактори, як середня густина зерен заповнювача і його активність стосовно в'язучого, характер пористості і ступінь водопоглинання. Інші фактори впливають на режим теплової обробки легкого бетону в такій ж мірі, як і важкого.

**Попередній розігрів бетонної суміші.** Приготування теплої бетонної суміші, що зберігає тепло протягом визначеного часу після укладання її у форму, дає можливість скорочувати режим теплової обробки на 2...2,5 години або одержувати необхідну міцність в початкові строки твердіння без теплової обробки.

Розігривають бетонну суміш до 50...90°C. Більш висока температура різко знижує легкоукладальність суміші і скорочує строки її тужавлення. Ефективність розігріву підвищується в міру збільшення активності цементу, оскільки високомарочні цементи виділяють більшу кількість тепла.

Попередній розігрів бетонної суміші зменшує залишкові деформації бетону внаслідок того, що компоненти суміші розширюються до укладання у форму.

**Види теплоносіїв.** Теплову обробку бетону здійснюють в основному в паровому, пароповітряному, повітряному і рідкому середовищах.

В середовищі *чистої насиченої пари* (вологість 100%, температура 100°C) цемент гідратує найбільше повно і швидко. Ця умова зберігається доти, поки вода формування знаходиться в рідкому стані. Застосування *перегрітої пари*, що характеризується температурою, що перевищує 100°C, і низьким тиском, приводить до повного зневоднювання бетону і припинення реакцій гідратації цементу.

Теплова обробка при температурі нижче 100°C відбувається в середовищі *пароповітряної суміші*. При цьому, чим нижче відносна вологість повітря, тим менш сприятливі умови для гідратації цементу.

*Повітряно-сухий прогрів* застосовують, як правило, при твердінні легкого бетону. Акумуляція пористим заповнювачем вологи, що утримується в цементному тесті, створює сприятливі умови для прискореного твердіння бетону при повітряно-сухому прогріві. Така обробка рекомендується для виробів з легких бетонів низьких марок і невисокої густини. При тривалому повітряно-сухому прогріві бетон



пересушується і міцність його знижується. Аналогічні процеси відбуваються при тепловій обробці в *газовому середовищі*, якщо гази не реакційно здатні стосовно складових бетону.

Для підвищення щільності і довговічності бетон обробляють у середовищі *гарячої* або *перегрітої рідини* (води або мінеральної оливи). Рідке середовище створює сприятливі умови для більш повної гідратації цементу: структуроутворення бетону інтенсифікуються, а кількість дефектів у ньому скорочується до мінімуму. Цикл теплової обробки бетону в рідкому середовищі коротший, ніж у паровому і, тим більше, у пароповітряному. Обумовлено це і різними коефіцієнтами тепловіддачі від середовища до виробу.

**Характеристика середовища і спосіб впливу теплоносія на бетон** суттєво впливають на якість бетону. Вироби надходять в теплові установки на піддонах і у формах (відкритих або закритих). Міцність бетону того самого складу при тому самому режимі відразу після теплової обробки, прогрітого у формі, в 1,5...2 рази більша, ніж розпалубленого, а прогрітого у відкритій формі під тиском – на 5...20% більша, ніж у закритій формі. Однак при інших складах бетону і режимах теплової обробки міцність розпалублених виробів може бути рівною міцності виробів, прогрітих у формах.

В період теплової обробки форма, перешкоджаючи вільному розширенню бетону, сприяє одержанню більш щільної структури. При негайній розпалубці розширення не обмеженого формою бетону перевищує величину температурного розширення металу. Тому розпалублені вироби необхідно пропарювати за іншими режимами, ніж у формах.

Відкриті поверхні залізобетонних виробів варто вкривати поліамідною плівкою, гумовим або металевим листом, іноді покриття поєднують із привантаженням. Покриття запобігають потраплянню конденсату на відкриту поверхню виробу, що виключає розм'якшення, спучування і порушення структури поверхневого шару. Акумулюючи тепло конденсату, покриття мають більш високу температуру, ніж поверхня виробу. У зв'язку із цим створюються сприятливі умови, що запобігають випаруванню вологи з оброблюваних виробів. Металеві покриття і покриття з привантаженням, крім того, зменшують залишкові деформації бетону. Міцність його під такими покриттями виходить більшою, ніж під м'якими, а цикл теплової обробки коротшим внаслідок дещо більшої швидкості прогріву або меншого часу попереднього витримання.





### **3.10.3. Попереднє витримування бетону**

В ряді випадків тепловій обробці **виробів з важких і легких бетонів** передуює попереднє витримування при температурі навколишнього середовища, під час якого бетон набуває початкової міцності, необхідної для сприйняття теплового впливу без порушення структури. Тривалість попереднього витримування залежить від різних факторів, основні з яких: марка і вид цементу, водоцементне відношення, температура навколишнього середовища і модуль відкритої поверхні виробів.

Чим вища марка цементу і температура навколишнього середовища і менше водоцементне відношення, тим коротший термін попереднього витримування бетону. Бетони на пластифікованих, гідрофобних, пуцоланових і шлакопортландцементних вимагають тривалого попереднього витримування; добавки – прискорювачі твердіння скорочують термін витримування, а пластифікатори – збільшують його.

Попереднє витримування обов'язкове при тепловій обробці розпалублених виробів, а також виробів з великим модулем відкритої поверхні. Це відноситься і до виробів складного профілю, тому що наступна теплова обробка може викликати утворення тріщин в місцях зміни профілю. Недоцільно витримувати вироби в касетах, пакетувальниках і термоформах.

**Вироби з ніздрюватих бетонів** витримують до набуття ними міцності, достатньої для транспортування в автоклав або пропарювальну камеру, і яка запобігає появу тріщин при тепловій обробці.

*Значення тривалості витримування для ніздрюватих бетонів наведені в п. 7.3.1.*

Попереднє витримування виробів – процес пасивний. Задача технолога – активізувати його, тобто прискорити твердіння при температурі навколишнього середовища. За цей час через бетон можна пропускати слабкі струми, впливати на нього магнітними полями, обробляти поверхню виробів хімічними або поверхнево-активними речовинами тощо.

При виготовленні збірного залізобетону на високо механізованих заводах попереднє витримування часте важко здійснене та економічно недоцільне: це знижує оборотність форм, викликає потребу в додаткових виробничих площах і т.п. В цьому випадку попереднє витримування можна замінити тепловою обробкою з тривалим (рівномірним або ступінчастим) періодом нагріву.



### 3.10.4. Особливості режимів теплової обробки в пароповітряному середовищі

Водяна пара – найбільш розповсюджений теплоносіє. Змішуючись з повітрям, що заповнює простір теплової установки, вона утворює пароповітряну суміш, що є легшою за повітря і тому піднімається вгору. В тепловій установці по висоті створюється перепад температур: висока – зверху і низька – знизу. Таким чином, нижні вироби знаходяться в менш сприятливих умовах, тому в теплових установках дуже важливою є циркуляція середовища.

Швидкість нагрівання виробів призначають з таким розрахунком, щоб уникнути виникнення великих температурних перепадів і напружень у виробах, особливо в щойно розпалублених і з великим модулем відкритої поверхні. При цьому враховують початкову міцність бетону, досягнуту в період попереднього витримання.

Орієнтовні швидкості підйому температури середовища камери  $v_c$  в залежності від початкової міцності бетону  $R_b$  наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Залежність швидкості нагріву від початкової міцності бетону

Початкова міцність бетону $R_b$ , МПа	Швидкість нагріву $v_c$ , °С/год
0,1...0,2	10...15
0,2...0,4	15...25
0,4...0,5	25...35
0,5...0,6	35...45
>0,6	45...60

Підвищення температури середовища камери зі швидкістю понад 60°С/год (незалежно від початкової міцності бетону) не рекомендується.

При використанні бетонних сумішей рухливістю понад 8 см тривалість підйому температури збільшують на 20...30%, якщо ж застосовані суміші жорсткістю понад 30 с – скорочують на 15...20% у порівнянні з наведеними рекомендаціями.

Крім того, враховують також мінімальну товщину виробів (див. табл. 7.1).

Максимальну температуру ізотермічного прогріву встановлюють в залежності від виду цементу. Її приймають 80...85°С для портландцементів, 90...95°С – для шлакових і пуцоланових портландцементів.



нтів і близько 200°C (при відповідному тиску) – для силікатних (автоклавних) в'язучих. При температурі нижче зазначеної потрібно збільшувати тривалість ізотермічного прогріву, а більш високі температури приводять до зменшення кінцевої міцності бетону.

**Тривалість ізотермічного прогріву** призначають в залежності від необхідної міцності бетону, виду і марки застосовуваного в'язучого, температури ізотермії та розмірів виробу. При хорошій теплоізоляції камер, коли температура середовища знижується не більше ніж на 4...6°C за 1 год, доцільно після 2...3-годинного ізотермічного прогріву припиняти подачу пари і надалі витримувати вироби в умовах повільного природного охолодження (т.зв. "термосний режим" – див. рис. 7.1). В цьому випадку період ізотермічного прогріву складається з двох стадій: прогріву виробів з подачею пари і витримання без її подачі.

**Швидкість охолодження** не повинна приводити до перепаду температур між поверхнею виробів і навколишнім середовищем більше ніж 40°C. При від'ємній температурі зовнішнього повітря розпалублені вироби рекомендується витримувати не менше 12 год. у теплому приміщенні із температурою не нижче +10°C. Це запобігає появі мікротріщин і підвищує довговічність виробів.

В цілому режим теплової обробки повинен забезпечувати досягнення бетоном після ТВО певного значення **відносної міцності**, яка залежить від відпускної (розпалубочної) міцності (в % від  $R_{28}$ , як правило 70%). Значення одержуваної відносної міцності бетону після теплової обробки можуть знаходитись в широкому діапазоні (50...85%) і залежать від режиму теплової обробки, марки цементу, водоцементного відношення та інших факторів (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Орієнтовна залежність відносної міцності пропареного важкого бетону від В/Ц

В/Ц	Відносна міцність бетону, % $R_{28}$ після пропарювання через	
	4 год.	28 діб
0,6 і більше	60...65	85...95
0,4...0,5	65...70	95...105
0,4 і менше	70...85	100...110

**Режими** теплової обробки попередньо напружених конструкцій призначають не тільки з метою забезпечення найбі-



льшої швидкості твердіння бетону і одержання необхідної відносної міцності, а й з врахуванням втрат напружень в арматурі. Втрати напружень відбуваються при виникненні тріщин у бетоні через нерівномірний прогрів і охолодження самого бетону, металевих форм і напруженої арматури, а також внаслідок температурного перепаду при виготовленні виробів на стендах з упорами, винесеними за межі камери, і т.д.

Втрати попереднього напруження від температурного перепаду можна значно зменшити, якщо він не перевищує  $65^{\circ}\text{C}$  при максимальній температурі ізотермічного прогріву  $80^{\circ}\text{C}$ , а також якщо після попереднього витримання, до набуття бетоном критичної міцності, температура в камері піднімається повільно або ступінчато. Крім того, під час виготовлення попередньо напружених конструкцій при від'ємній температурі навколишнього середовища рекомендується попередньо підігрівати камери до  $20^{\circ}\text{C}$  з наступною підтяжкою попередньо напруженої арматури до проектної величини та використовувати підігріті бетонні суміші.

Для найбільш характерних випадків виготовлення попередньо напружених конструкцій призначають усереднені режими теплової обробки (табл. 3.5).

Таблиця 3.5

Розрахунковий режим теплової обробки попередньо напружених конструкцій із важких бетонів при виготовленні на стендах

Режим обробки	Тривалість, год.
Нагрівання до $80^{\circ}\text{C}$	7
Ізотермічне витримання при $80^{\circ}\text{C}$	6,5
Охолодження	1,5

При тепловій обробці розпалублених виробів і виробів у формах з великим модулем відкритої поверхні, коли часу для попереднього витримання недостатньо, піднімати температуру середовища камери рекомендується у *прогресивно зростаючому темпі*. Незалежно від товщини виробу в першу годину періоду підігріву швидкість підйому температури середовища камери призначають  $10...15$ , в другу –  $15...25$ , в третю –  $25...35^{\circ}\text{C}$  за 1 год. і т. д. Чим вища марка цементу і нижче В/Ц бетонної суміші, тим швидше можна піднімати температуру середовища камери.

Режими з *постійно наростаючою швидкістю* підйому температури можна замінити *ступінчатими*: за  $1...1,5$  год. підйом температури до



30...40°C, витримування при ній протягом 1...2 год, потім інтенсивний підйом температури до максимально прийнятої за 1...1,5 год. При завантаженні виробів у пропарювальну камеру, де температура дорівнює 30...35°C, можливо 1,5...2-х годинне витримування їх без подачі пари, що рівноцінно першому ступеню підйому температури.

У випадку застосування пластифікуючих добавок щойно відформовані вироби необхідно витримувати 4...6 год., а піднімання температури середовища камери проводити повільно.

Теплову обробку виробів, до яких висуваються підвищені вимоги по морозостійкості, роблять за наступними режимами: попереднє витримування – не менше 3...5 год.; швидкість підйому температури середовища камери – не більше 10...15°C/год; температура ізотермічного прогріву – не вище 80°C; охолодження виробів – зі зволоженням відкритих поверхонь водою. Вироби з морозостійких бетонів необхідно витримувати в спеціальних камерах дозрівання при високій відносній вологості середовища або у водних басейнах не менше трьох діб.

При пропарюванні (як і при інших способах теплової обробки) **легких бетонів** виділяють бетони щільної структури класів більше та менше В7,5, поризовані бетони і легкі бетони з підвищеним початковим водовмістом. Оптимальні режими пропарювання повинні встановлюватися дослідним шляхом з врахуванням наступних положень.

Вироби з легких бетонів щільної структури класів понад В7,5 із густиною більше 1200 кг/м<sup>3</sup> (*конструктивні легкі бетони*) можуть пропарюватися у відповідності із режимами, наведеними в табл. 7.2. На них поширюються (з деякими допущеннями) всі основні положення пропарювання, характерні для важких бетонів.

Легкі бетони щільної структури густиною менше 1200 кг/м<sup>3</sup> (*конструктивно-теплоізоляційні легкі бетони*), як правило, відразу після оптимального режиму пропарювання одержують міцність, близьку до марочної. Відпускна міцність таких бетонів приймається не менше 80% марочної. При цьому для виробів товщиною до 30 см доцільно застосовувати форсовані режими з інтенсивним підйомом температури (40...50°C/год) і наступним ізотермічним витримуванням при температурі 90...100°C. Однак після теплової обробки вироби із таких бетонів мають високу залишкову вологість, що погіршує їх теплофізичні властивості. Зменшити відпускну вологість можна тепловою обробкою в умовах, що сприяють випаруванню вологи з бетону (наприклад, комбінацією прогріву сухим повітрям і через 1...4 год. гострою парою, або прогрівом трубчастими електронагрівниками,





рою, або прогрівом трубчастими електронагрівниками, ТЕНами, калориферами, інфрачервоними випромінювачами або газовими пальниками з доведенням максимальної температури середовища камери до 120...150°C і т.п.).

Вироби з *поризованих легких бетонів* (які відносяться до групи конструктивно-теплоізоляційних) повинні піддаватися, як правило, пропарюванню за "м'якими" режимами з попередньою витримкою до пропарювання протягом 3...4 год. і повільним підйомом температури до 90...100°C зі швидкістю 15...20°C/год.

Вироби з легких бетонів із підвищеним водовмістом (керамзитоперлітобетон, перлітобетон тощо) повинні пропарюватися за "м'якими" режимами як і поризовані бетони.

Теплова обробка у повітряно-сухому середовищі рекомендується тільки для легких бетонів низької густини (до 800 кг/м<sup>3</sup>).

Режими пропарювання легких конструктивно-теплоізоляційних бетонів можна призначати, користуючись табл. 3.6.

Таблиця 3.6  
Режими пропарювання виробів з легких бетонів для досягнення  
75...80% відносної міцності

Вид легкого бетону у виробі	Густина щойно відформованого бетону, кг/м <sup>3</sup>	Клас бетону	Товщина бетону у виробі, мм	Розрахункові режими, год., при температурі ізотермічної витримки 90...95°C	Загальна тривалість ТВО, год.
Керамзитобетон, аглопоритобетон, шлакобетон	800...1200	≤ В7,5	< 200	2+5+1	8
			≥ 200	2+7+2	11
	1200...1800	> В7,5	< 200	2+7+1	10
			≥ 200	2+8+2	12
Перлітобетон	600...800	≤ В3,5	< 200	4+3+1	8
			≥ 200	5+3+2	10
	800...1200	> В3,5	< 200	4+3+1	8
			≥ 200	5+4+2	11
Легкий поризований бетон	800...1200	≤ В7,5	< 200	4+5+1	10
			≥ 200	5+5+2	12

*Орієнтовні режими та інші дані для ТВО виробів із важких та легких бетонів, які не розглянуті в даному пункті наведені в п. 7.3.1.*



До недоліків теплової обробки бетону в пароповітряному середовищі можна віднести складність підтримання високої вологості середовища і одночасного підвищення температури; значна тривалість теплової обробки через недостатньо високу температуру і низький коефіцієнт тепловіддачі середовища виробу; часткове підсушування поверхневого шару бетону і значний перепад температур по висоті при відсутності циркуляції середовища. Ці недоліки можна усунути тепловою обробкою виробів у середовищі насиченої водяної пари.

### **3.10.5. Теплова обробка в середовищі чистої насиченої пари**

Теплова обробка бетону в **безнапірних установках** в середовищі чистої насиченої пари наближається до умов пропарювання в автоклавах і тому одержала назву *напіваавтоклавної*. Її переваги в порівнянні з тепловою обробкою в пароповітряному середовищі полягають у тому, що внаслідок більш високого коефіцієнта віддачі тепла насиченої пари виробам прискорюється їх прогрівання і забезпечується більш інтенсивне твердіння бетону при температурі, близької до 100°C; при прогріві в середовищі зі 100%-ною вологістю виключається випарування вологи з бетону і його висушування. Крім того, однакова температура в усьому об'ємі камери забезпечує одержання виробів рівної якості.

При обробці виробів в **автоклавах** періоди підігріву й охолодження поділяються на два етапи, границею яких є температура 100°C. Такий розподіл необхідний внаслідок того, що при температурах до 100°C виникають великі термічні напруження, що приводять до зниження якості виробів. При різкому нагріванні і охолодженні через різні значення парціального тиску пари в середовищі автоклава і у порах виробів можливе закипання води в них і, як наслідок, порушення структури бетону. Внаслідок цієї ж причини при підйомі тиску неприпустимими є перерви в подачі пари.

Необхідний тиск пари, а також критична швидкість підйому і зниження тиску залежать від виду в'язучого і бетону, масивності виробів і ряду інших факторів. Підвищувати тиск пари в автоклаві доцільно лише до певної визначеної величини. Загальновизнаний максимальний тиск пари 0,8...1,6 МПа, при якому утворюється щільна дрібнопориста структура бетону. Підвищення тиску і тривалості ізобарного прогріву понад оптимальні значення викликає в бетоні надмірний ріст



кристалів, слабо зв'язаних між собою, збільшуються розміри капілярів і мікротріщин.

Період охолодження до  $100^{\circ}\text{C}$  характеризується різким спадом температури середовища і виробів, а нижче  $100^{\circ}\text{C}$  – уповільненим її падінням. Для рівномірного охолодження і зниження залишкової вологості автоклавний простір рекомендується вакуумувати (8...9 кПа) протягом 1...3 год., потім відкрити кришку автоклава і охолодити виробу до температури, що не перевищує цехову на  $40...50^{\circ}\text{C}$ . Тривалість цього періоду близько 0,5 год.

*Орієнтовні режими автоклавної обробки виробів із ніздрюватих бетонів наведені в табл. 7.10. Особливості роботи автоклавів розглянуті в п. 3.12.5.*

### **3.10.6. Теплова обробка контактним способом**

Теплову обробку залізобетонних виробів контактним способом здійснюють в касетних установках і термоформах. В жорстких металевих формах попереднє витримування до теплової обробки є не обов'язковим. Швидкість підйому температури у відсіках досягає  $60...70^{\circ}\text{C}$  за 1 год., а різниця температур по площі відсіку не повинна перевищувати  $20^{\circ}\text{C}$ .

**Період ізотермічного прогріву** складається, як правило, з двох етапів: подача пари в теплові відсіки і термосне витримування виробів без подачі пари (див. "ніковий" режим, рис. 7.1).

При тепловій обробці контактним способом вимоги до **охолодження виробів** ті ж, що і при інших способах. Однак треба враховувати дуже повільне охолодження виробів, особливо при касетному способі формування. Після відключення пари температура в теплових відсіках знижується зі швидкістю  $3...4^{\circ}\text{C}$  за 1 год. Тому відсіки штучно охолоджують водою або примусовою вентиляцією протягом 1...3 год. з часу, відведеного на термосне витримування виробів. Незважаючи на це, температура розпалублених виробів іноді може досягати  $70...80^{\circ}\text{C}$ .

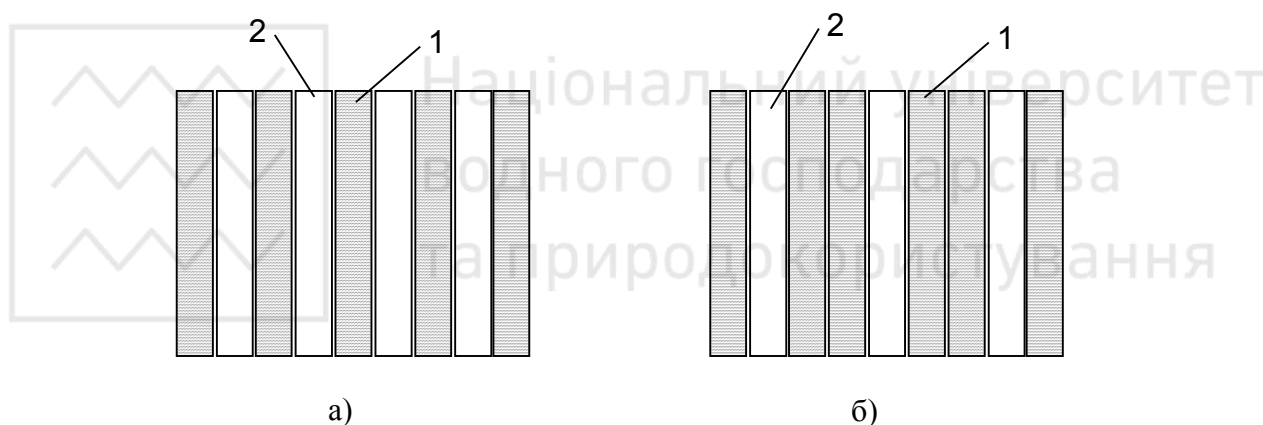
Для захисту поверхні бетону від висихання в процесі теплової обробки її рекомендується накривати брезентом, плівками, матами, щитами і т.п.

Скоротити цикл теплової обробки можна попереднім підігрівом касет або форм до  $40...45^{\circ}\text{C}$  або повторним вібруванням щойно відформованого виробу. Вібрацію, тривалістю 0,5...1 хв, повторюють через кожні 0,5 год. після формування. Весь цикл повторного вібрування



займає 1...2 год. Це дозволяє збільшити міцність бетону на 20...40% або при постійній міцності скоротити цикл теплової обробки на 2...3 год.

**Режим теплової обробки** залежить в основному від розташування теплових відсіків, що визначають товщину шару бетону, який прогрівається: чим менше товщина бетону між тепловими відсіками, тим швидше він прогрівається. Так, в *касетних установках*, що мають теплові відсіки через один виріб (двосторонній прогрів), тривалість теплової обробки скорочується на 25...35% у порівнянні з розташуванням теплових відсіків через два вироби (односторонній прогрів). Хоч установка додаткових теплових відсіків збільшує металоємність касетної установки приблизно на 15%, її оборотність зростає більше ніж на 20...25%, тому влаштування теплових відсіків через один виріб часто є більш економічним варіантом.



**Рис. 3.19.** Варіанти схем розташування парових та формувальних відсіків в касетних установках:

а) двосторонній прогрів; б) односторонній прогрів  
1 – формувальний відсік; 2 – паровий відсік

*Розрахункові режими теплової обробки виробів з важкого бетону при розташуванні теплових відсіків через два формувальних наведені в табл. 7.3.*

Температуру ізотермічного прогріву виробів із легких бетонів можна доводити до 100°C. При виготовленні виробів в *касетних установках* можна приймати наступний режим: підйом температури – 2...3 год, ізотермічний прогрів з подачею пари – 2...3 год і термосне витримування при відключеній парі – 2...4 год.

Орієнтовний режим теплової обробки в *термоформах* виробів з максимальною товщиною перерізу до 300 мм із бетону марки 300 при



досягненні 70% проектної міцності через 4 год після закінчення теплової обробки можна приймати наступним: підйом температури у відсіку термоформи до максимальної – 1...2 год; ізотермічний прогрів при максимальній температурі в тепловому відсіку 80...90°C – 5...6 год; витримування виробів в термоформі без подачі пари – 2...3 год. Тривалість теплової обробки треба збільшувати при підвищенні масивності виробів і зниженні проектної марки бетону або скорочувати, якщо вироби менш масивні або використані бетони більш високих марок.

При тепловій обробці виробів у пакетах рекомендується простір між термоформами герметизувати і створювати в ньому тиск 0,1 МПа. Це створює сприятливі умови для формування структури і набору міцності бетоном.

Теплову обробку віброгідропресованих труб проводять *пуском пари* у внутрішню порожнину сердечника і під брезентовий чохол. Крім того, для гідропресування використовують також *тепло води*, нагрітої до 70...80°C. Через 1 год. після подачі пари температура бетону повинна досягати 80...85°C. Загальна тривалість теплової обробки знаходиться в межах від 4...5 год. для труб діаметром 500 мм, до 7...9 год. для труб діаметром 1200 мм. По закінченні теплової обробки подачу пари припиняють, протягом 5...7 хв скидають тиск води під гумовим чохлом і випускають її із сердечника.

Теплову обробку об'ємних елементів здійснюють контактним паропрогрівом крізь порожнини піддона, стін зовнішньої форми і верхнього щита сердечника. Режим теплової обробки: підйом температури до 95°C – 2 год., ізотермічний прогрів – 2 год., витримування без подачі теплоносія – 0,5 год. і охолодження при відкритих щитах – 0,5 год.

*Особливості роботи теплових установок, що працюють за контактним способом, розглянуті в п. 3.12.2 – 3.12.4.*





### 3.11. КЛАСИФІКАЦІЯ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ

Умови прискороного твердіння бетону за рахунок підвищення температури і вологості навколишнього середовища і самого бетону можуть бути створені в теплових установках різних конструкцій при використанні різних способів теплової обробки\*.

Установки для тепловологісної обробки бетонних і залізобетонних виробів класифікують за наступними ознаками:

1. *За видом теплоносія:*

- водяна пара при підвищеній ( $t > 100^{\circ}\text{C}$ ) температурі;
- пароповітряна суміш ( $t = 50 \dots 100^{\circ}\text{C}$ );
- димові гази;
- вода;
- гаряча олива, петролатум і т.ін;
- електроенергія.

2. *За способом передачі тепла:*

- з безпосереднім контактом теплоносія (конвективний);
- через поверхню нагрівання (контактний або кондуктивний);
- теплове випромінювання;
- струмами високої частоти (індукційний).

3. *За тиском робочого середовища:*

- установки, що працюють при атмосферному тиску;
- при тиску вище атмосферного ( $0,4 \dots 2,5$  МПа);
- під розрідженням.

4. *За режимом дії:*

- періодичної дії;
- неперервної дії.

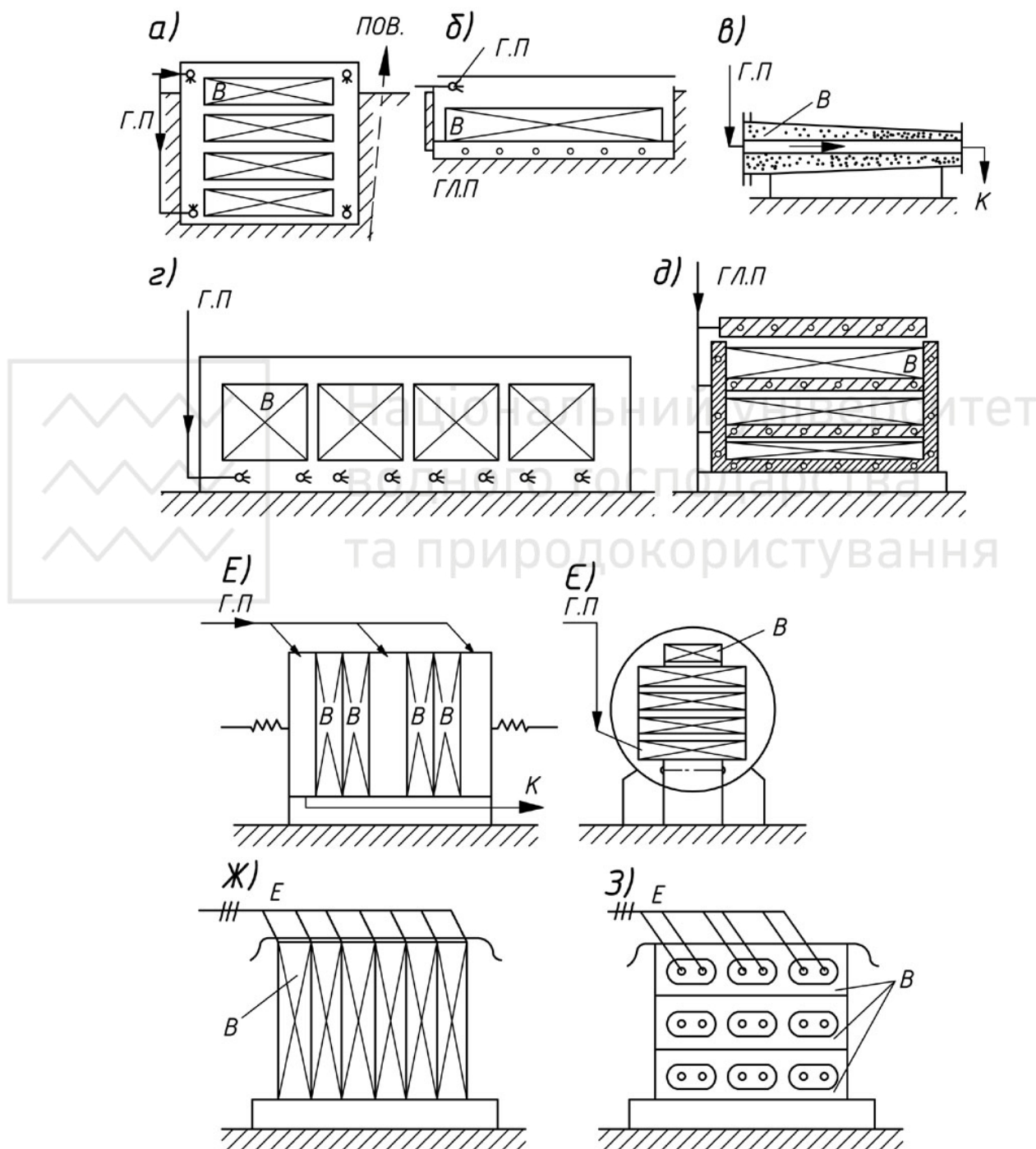
5. *За основною конструкцією:*

- установки періодичної дії (рис. 3.20) – ямні камери (а), стени (б), установки для пропарювання під ковпаком і термомощитом, установки для пуску пари в порожнини виробів (в), камери тунельні (г), термоформи індивідуальні або пакетні (д), касетні установки (е), автоклави (є), установки для електронагріву у вертикальних формах (ж) і за допомогою інфрачервоних променів (з);

\* Класифікація способів теплової обробки розглянута в п. 3.7.2.

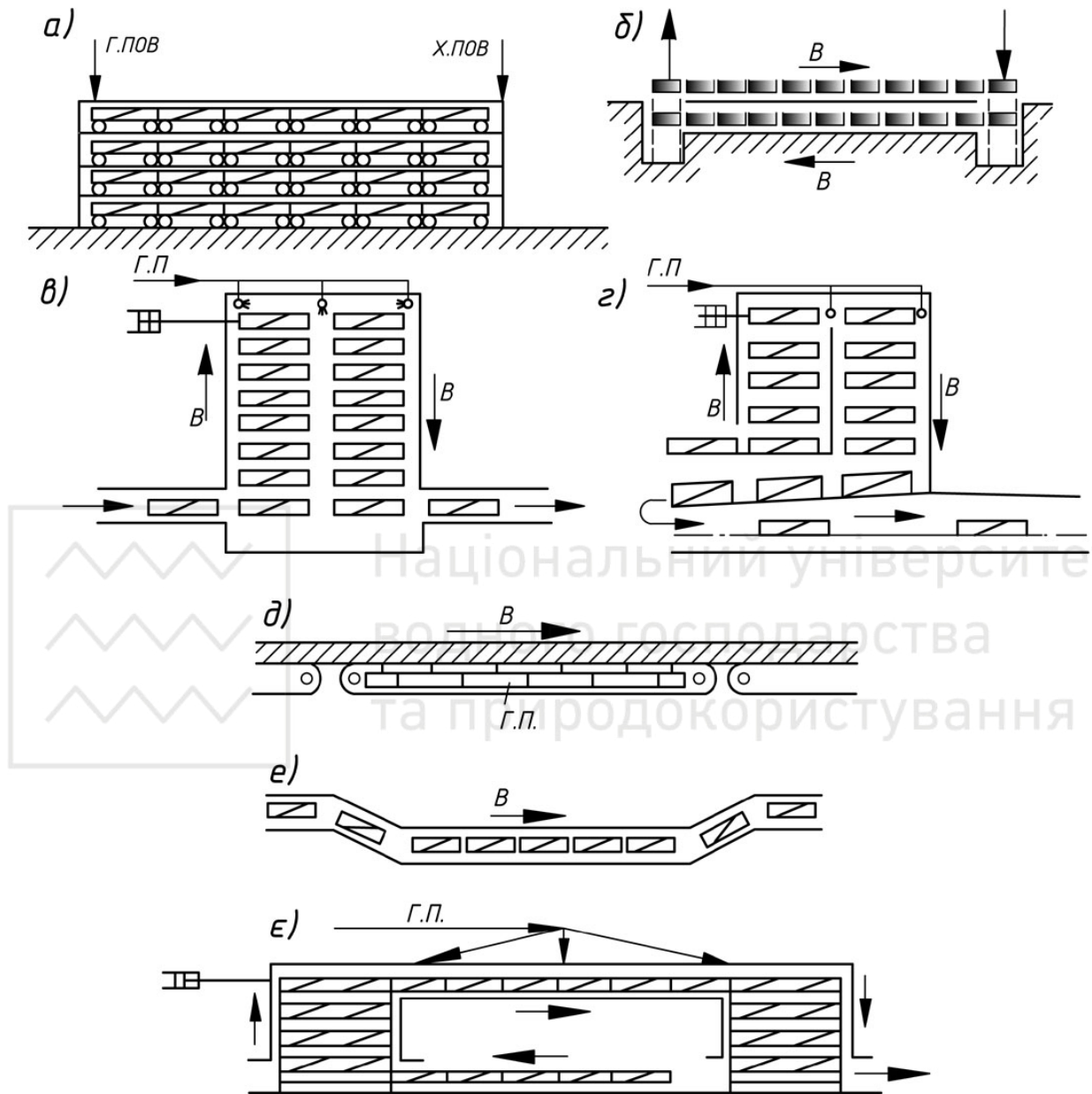


- установки неперервної дії (рис. 3.21) – тунельні камери: багатоярусні (а), одноярусні (щілинні) (б), вібропрокатні стани (в), водні конвеєри (г), вертикальні камери (д), вертикальні камери з охолоджувальним коридором (е), камери П-подібні (є), термоформи-пакетувальники (ж) і деякі інші.



**Рис. 3.20.** Схеми установок для ТВО періодичної дії:

г.п. – "гостра" пара; г.л.п. – "глуха" пара; е – електроди, к – конденсат;  
в – вироби; пов. – повітря.



**Рис. 3.21.** Схеми установок для ТВО неперервної дії:  
*г.п.* – "гостра" пара; *в* – вироби; *г. пов.* – гаряче повітря;  
*х. пов.* – холодне повітря.



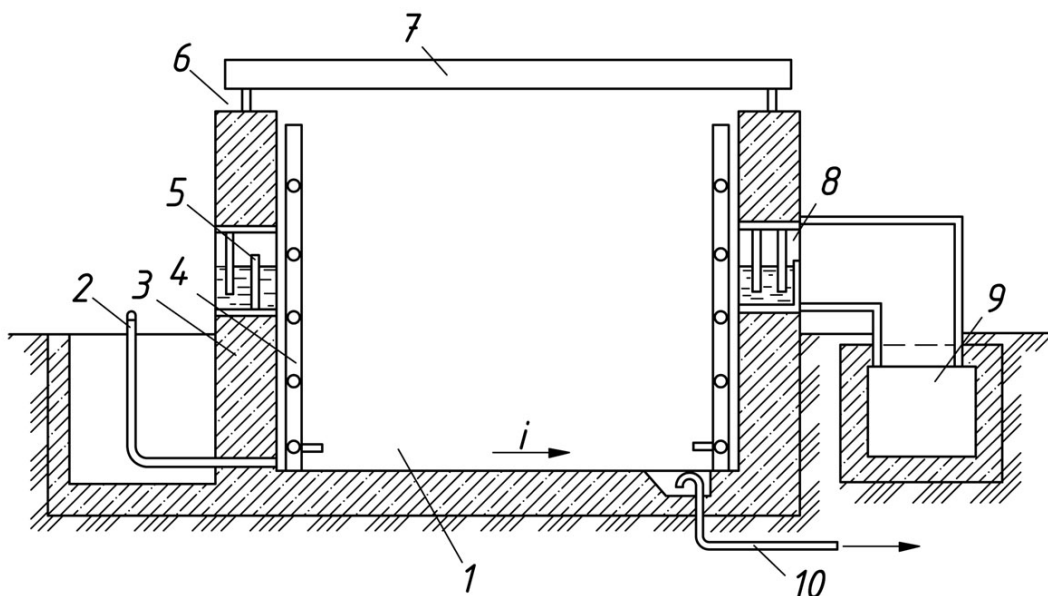
## 3.12. ТЕПЛОВІ УСТАНОВКИ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ

### 3.12.1. Ямні камери

Простими і одними з найбільш розповсюджених на підприємствах збірного залізобетону є пропарювальні камери ямного типу. Такі камери використовують як в цехах так і на полігонах при агрегатно-потоккових технологіях виробництва. Виконують їх заглибленими або напівзаглибленими в залежності від технологічних особливостей.

До основних конструктивних елементів ямних камер відносяться огороження (підлога, стіни, кришки), системи розведення пари і вентиляції.

Виготовлена із залізобетону **пропарювальна ямна камера** має прямокутну форму (рис. 3.22). Стінки камери 3 для зменшення теплових втрат роблять комбінованими (конструкції стін, днища і кришки розглядаються далі). По бокових стінках камери встановлені стійки з кронштейнами 4. В одній із бокових стінок робиться отвір для забору повітря 5 з атмосфери при охолодженні, обладнаний водяним затвором. З'єднання кришки 7 зі стінками камер також обладнано водяним затвором 6. Для відбирання пароповітряної суміші влаштований канал 9, що з'єднується через водяний затвор 8 із системою вентиляції.



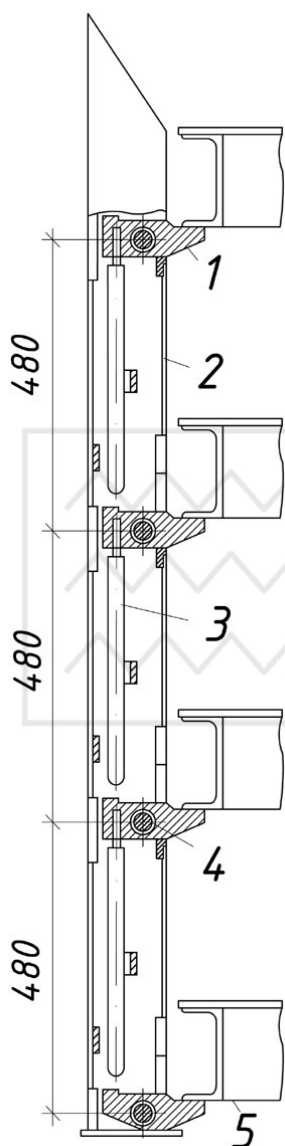
**Рис. 3.22.** Схема пропарювальної ямної камери:

1 – камера; 2 – паропровід; 3 – стінки камери; 4 – стійки з кронштейнами; 5 – гідрозатвор подачі повітря; 6 – гідрозатвор кришки; 7 – кришка; 8 – гідрозатвор системи вентиляції; 9 – вентиляційний канал; 10 – конденсатовідвідник



В днищі передбачена система відбирання конденсату 10, що пропускає його і не пропускає пару. Для нагрівання виробів через паропровід 2 у камеру подається пара.

Камери розміщуються в технологічних лініях і з'єднуються в блоки по 4...8 шт. Розміри камер залежать від виду, габаритів виробів і системи пароподачі. Здебільшого висота камер складає 2,5...3,5 м, ширина 1,5...4 м і довжина 7...14 м. Глибина підземної частини камер визначається рівнем ґрунтових вод і висотою підкранового обладнання.



**Рис. 3.23.** Стійка з кронштейнами для ямних камер:

- 1 – кронштейн;
- 2 – стійка; 3 – противага кронштейна;
- 4 – вісь кронштейна; 5 – форма

В камері вироби укладають таким чином, щоб коефіцієнт її заповнення був максимальним. При цьому необхідно забезпечувати можливість всебічного обтікання виробів паром, для чого між ними і стінками камер залишають зазори. По вертикалі форми з виробами укладають одну на іншу через прокладки, а щойно розпалублені вироби на піддонах встановлюють на стійки з фіксованими, автоматично висувними кронштейнами-упорами, що зв'язані між собою тягами (рис. 3.23). Нижній кронштейн, на який поставлений піддон з виробом, через систему тяг готує до установки наступний кронштейн, розташований над ним.

Відстань між формами складає 50...75 мм, між дном камери і днищем нижньої форми – 150 мм, між верхнім виробом і кришкою – 50 мм (для циркуляції теплоносія).

Для камер ямного типу застосовують *пакетувальники*, що дозволяють укласти вироби з кроком від 480 до 965 мм. За допомогою цих пакувальників вироби можна вкладати в чотири-сім ярусів.

Принцип роботи камери полягає в наступному. З камери 1 знімається кришка 7 (див. рис. 3.22). Виріб у формі опускається краном в камеру і встановлюється на нижні кронштейни стійок 4. Навантажені кронштейни змушують розкритися наступний ряд і так далі. Після завантаження камери закривається кришка, заповнюються водяні затвори і починається подача пари. Вироби нагріваються





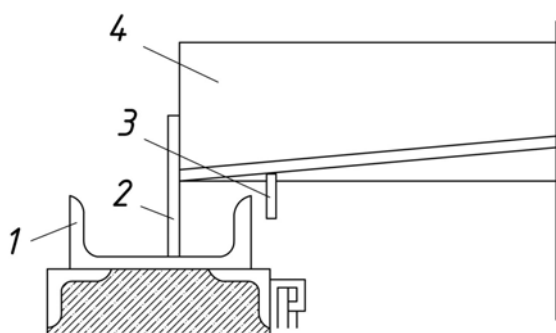
(період нагріву) а потім витримуються (ізотермічна витримка) при досягнутій температурі.

В процесі нагріву та ізотермічної витримки пара конденсується, віддає теплоту і у вигляді конденсату видаляється через систему 10. По закінченні витримки подача пари припиняється, і через канал 9 з камери видаляється пароповітряна суміш. При цьому вода в затворах закипає і у вигляді пароповітряної суміші також видаляється. Через затвор, що звільнився від води, 5 а також через затвор 6, що з'єднає кришку зі стінками, у камеру надходить повітря, що охолоджує вироби, саме нагрівається і також видаляється в канал 9. Після охолодження виробів камера розкривається, а вироби, що набрали 70...80 % марочної міцності, вивантажуються з камери краном.

Оскільки камера не є герметичною установкою (стіни і затвори витримують дуже невеликий надлишковий тиск або розрідження), то в камері практично підтримується атмосферний тиск ( $\sim 0,1$  МПа). При подачі пари в камеру в ній знаходилося повітря, тому можна записати, що тиск у камері  $P_k$ , рівний атмосферному, складається із парціального тиску пари  $P_n$  і парціального тиску повітря  $P_{пов}$ :

$$P_k = P_n + P_{пов} = 0,1 \text{ МПа} . \quad (3.31)$$

Звідси  $P_n = 0,1 \text{ МПа} - P_{пов}$ , тобто парціальний тиск пари менший атмосферного. Тому температура в ямній камері повинна бути меншою  $100^\circ\text{C}$ . В дійсності максимальна температура в такій камері не перевищує  $85...95^\circ\text{C}$ .



**Рис. 3.24.** Схема з'єднання кришки із стінами ямної камери:

- 1 – швелер водяного затвору;
- 2 – опорне ребро гідрозатвору;
- 3 – ущільнювальне ребро;
- 4 – кришка камери

Для запобігання вибивання пари в проміжку між стінами і кришкою встановлюють *гідрозатвор* (водяний затвор), що представляє собою заповнений водою жолоб з металевого швелера 1, що укладається по верхньому периметру стін камери (рис. 3.24). До днища швелера приварена і замонолічена в стіни металева смуга, що перешкоджає зрушенню затвора при укладанні кришки і проходженню пари під затвором. Проходженню пари над швелером перешкоджає опорне ре-



бро 2 (смуга або кутик), приварене до кришки 4, яке опускаються у воду гідрозатвора при закриванні кришки.

*Кришки* ямних камер паропрогріву являють собою жорстку металеву конструкцію товщиною 150...200 мм, паро- і гідроізолювану по відношенню до парового середовища камери і теплоізолювану зовні. З внутрішньої сторони кришка має невеликий ухил (до 5 %) до гідрозатвора для стоку осадженого конденсату, що, тим самим, попереджає порушення поверхні бетонних виробів від падаючих крапель.

Кришки не повинні деформуватися при знятті їх і перестановці кранами. Уникнути численні перестановки, удари, деформації кришок дозволяє установка гідроприводу підйому кришки у вертикальне положення.

*Огородження камери* (стіни і підлога) можна виконувати з монолітного або збірного залізобетону, однак підвищені вимоги до економії теплової енергії привели до розробки різних сучасних конструкцій огорожень, що відрізняються підвищеними теплозахисними властивостями. Внутрішні поверхні камери покриті гідроізоляцією, що запобігає їхньому зволоженню і підвищенню теплопровідності. Підлога камери має ухил (0,005...0,01 %) для стоку конденсату в каналізацію. *Особливості влаштування теплоефективних огорожень камер теплової обробки розглядаються в п. 3.16.2.*

Однією з умов раціональної витрати пари при тепловологісній обробці виробів в ямних камерах, а також на створення рівномірного нагрівання цих виробів є *організація подачі пари*. Якщо система пароподачі не забезпечує циркуляцію теплоносія, то в камері відбувається розшарування пароповітряного середовища по висоті, оскільки пара, маючи нижчу густину ( $\rho = 0,8 \text{ кг/м}^3$ ), ніж повітря ( $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ ), піднімається вгору, погіршуючи умови обробки нижніх виробів.

Поширені і прості системи паропостачання і паророзведення в камерах не забезпечують рівномірність прогрівання виробів, оскільки зосереджений випуск пари приводить до перегрівання прилеглих виробів (або поверхонь виробів) і недогрівання віддалених. Крім того, випуск пари через перфоровані паропроводи, покладені по периметру днища, або через перфоровані плити в нижній частині камери приводить до плавного підйому пари уздовж стін тільки у верхню зону камери і переважного прогрівання стін камери і торців виробів. Проміжки між виробами зайняті повітряним прошарком, пара сюди не потрапляє і тому плоскі поверхні виробів у теплообміні практично не приймають участь. Через більш високу інтенсивність

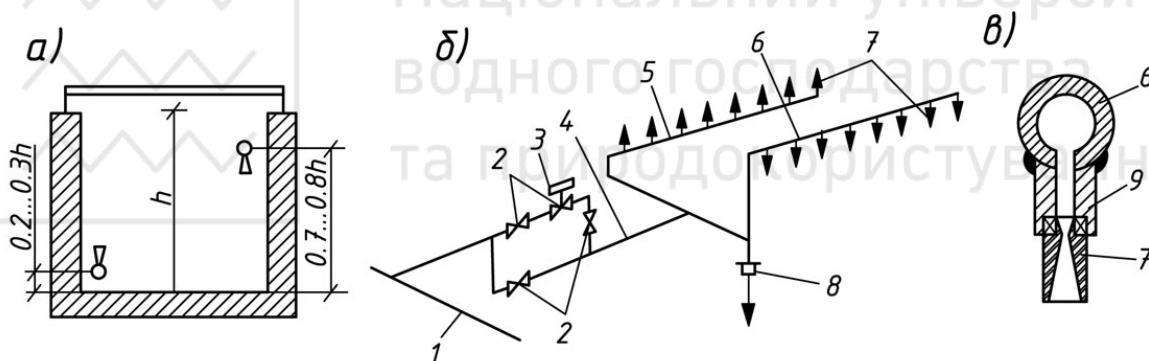


теплообміну в паровому середовищі прогрівання виробів у верхній частині камери проходить значно швидше, ніж у нижній, заповненій повітрям.

В результаті в одному місці виріб може отримати 80% марочної міцності, в іншому 60%, в третьому 40%. Все це змушує подовжувати терміни теплової обробки і збільшувати питомі витрати пари. Тому організації подачі пари в ямні камери повинна відводитись значна увага.

Існує велика кількість ефективних схем постачання паром ямних камер. Деякі з них розглянуті в п. 3.16.3.

Ідея системи паропостачання ПДК-КІСІ (рис. 3.25) полягає в інтенсифікації циркуляції пари, для чого передбачена основна гілка подачі пари з магістралі, обладнана регулятором 3; обвідна гілка включається у випадку відмови регулятора 3. Обидві гілки обладнані запірними вентилями 2, для включення їх у роботу роздільно. З магістралі 1 пара розводиться в нижній та верхній паропроводи – колектори 5 і 6, розташовані на протилежних стінах камери і обладнані соплами 7.



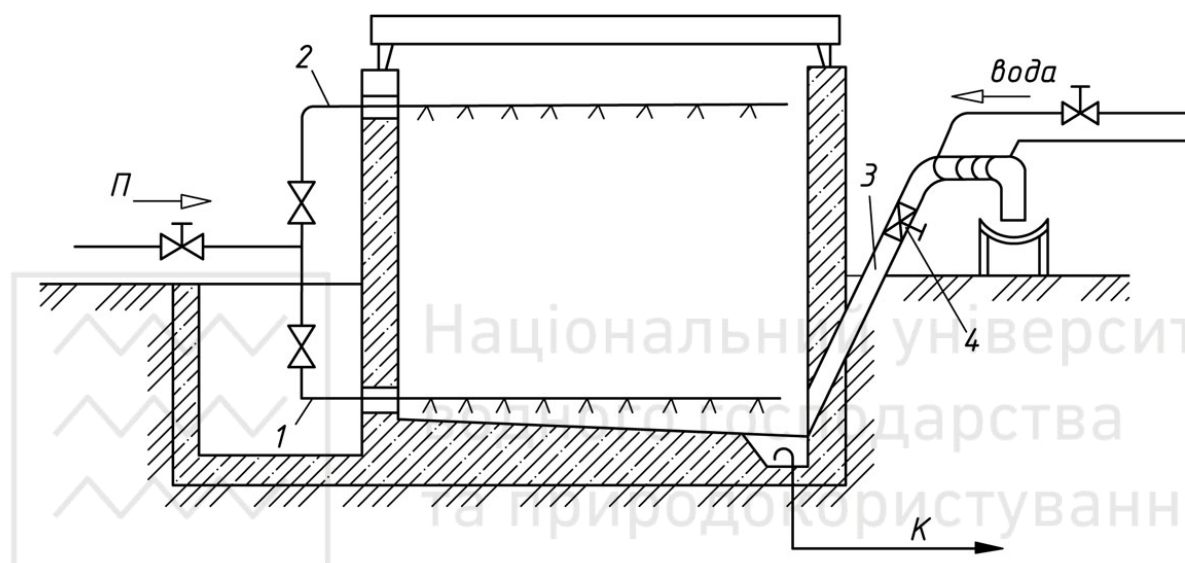
**Рис. 3.25.** Схема паропостачання в ямній камері системи ПДК-КІСІ:

а – вид камери в розрізі; б – система паророзподілу; в – розріз сопла  
1 – магістраль подачі пари; 2 – вентиля; 3 – регулятор; 4 – підвідний паропровід;  
5, 6 – нижній і верхній паропроводи із соплами; 7 – сопла; 8 – знімна дросельна шайба для стоку конденсату; 9 – муфта

В нижньому колекторі, що знаходиться на рівні  $0,2...0,3 h$  (висоти камери) сопла спрямовані вгору і створюють циркуляцію по ходу викиду пари. Верхній колектор розташований на висоті  $0,7...0,8 h$ . В ньому сопла спрямовані вниз. Таке розташування сопел створює достатню циркуляцію пароповітряного середовища камери. Тим самим ліквідуються застійні ділянки, повітряні прошарки між виробами і в теплообміні беруть участь всі поверхні виробів. Завдяки інтенсивній циркуляції гріючого середовища, тривалість прогріву і питома витрата

теплоносія в 1,5...2 рази нижче, а рівномірність обробки вище, ніж у камерах із простою системою паропостачання.

Для тепловологісної обробки окремих бетонних виробів (наприклад, шлакобетонних) необхідна температура близько  $100^{\circ}\text{C}$ . Таку температуру можна досягнути в **безнапірній пропарювальній камері типу Л.А.Семенова**. Дана камера (рис. 3.26) дозволяє створювати окрім звичайних температур  $80...90^{\circ}\text{C}$ , чисте парове середовище з відносною вологістю 100% і температурою  $100^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 3.26.** Схема ямної пропарювальної камери, що працює в середовищі чистої пари (вентиляційні пристрої не показані)

Камера обладнана нижнім 1 і верхнім 2 колектором роздачі пари, а також трубою 3 із запірним вентиляем 4, що обладнана змійовиком із проточною холодною водою. В камеру подається пара, а з неї видаляється конденсат. Після завантаження камери включається нижня перфорована труба 1, закривається вентиль подачі пари у верхню трубу і вентиль 4 на трубі 3. Камера і вироби одночасно нагріваються до температури близько  $85...90^{\circ}\text{C}$ .

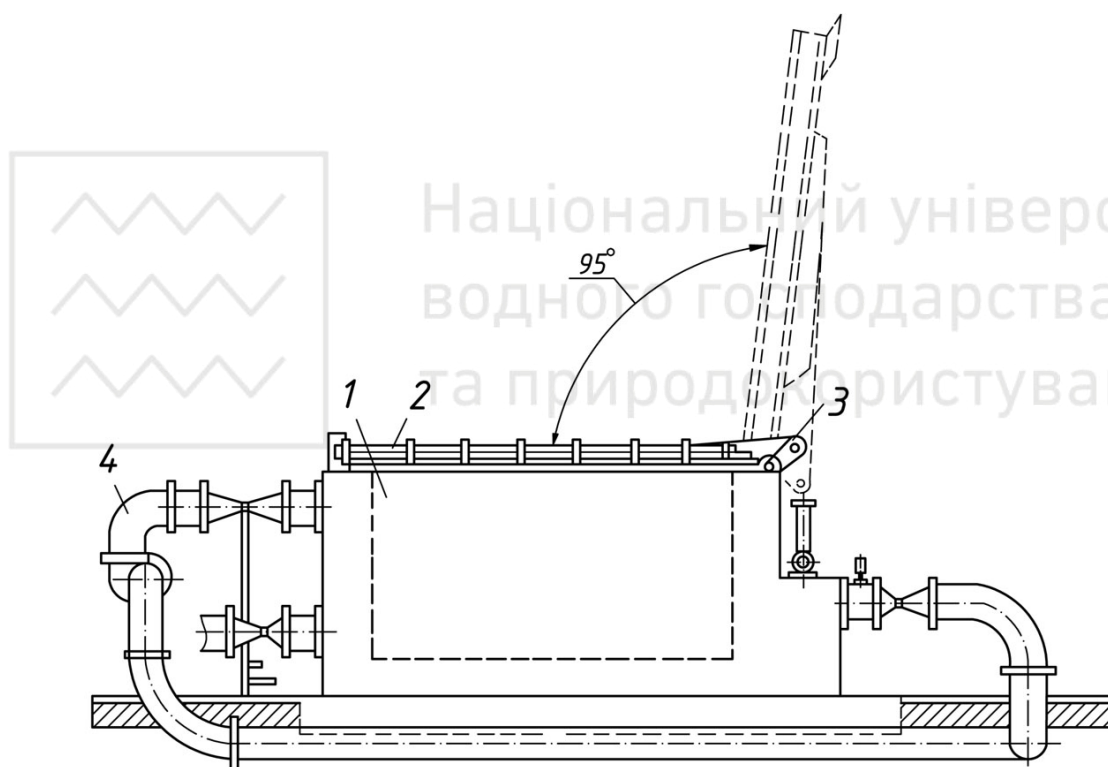
Загальний тиск у камері атмосферний ( $\sim 0,1$  МПа); він складається з парціального тиску пари  $P_n$  і парціального тиску повітря  $P_{нов}$ . Після досягнення температури  $85...90^{\circ}\text{C}$  відключають нижній колектор подачі пари і включають верхній. Пара починає надходити у верхню частину камери.

Далі відкривають вентиль і пароповітряна суміш починає через трубу 3 витіснятися з камери. Повітря виходить у цех, а пара, внаслідок охолодження труби 3 холодною водою, конденсується і стікає по



жолобу. Як тільки вся пароповітряна суміш буде витиснута з камери, термометр в гирлі труби 3 покаже  $100^{\circ}\text{C}$ . Тоді клапан 4 закривають. Отже, все повітря з камери витіснене; в ньому знаходиться чиста пара ( $P_n \sim 0,1 \text{ МПа}$ ). Подальший процес аналогічний процесу обробки виробів у звичайній ямній камері.

Якість виробів, що проходять обробку в ямних камерах паропрогріву, підвищують, застосовуючи **малонапірні камери** (рис. 3.27), в яких створюється надлишковий тиск  $0,02 \dots 0,03 \text{ МПа}$ . Камера має внутрішню сталеву сорочку товщиною 6 мм і обладнана кришкою з замикаючим пристроєм, механізмами підйому й опускання. Кришку виготовляють з металевих профілів, обшивають металевим листом і заповнюють теплоізоляцією.



**Рис. 3.27.** Малонапірна пропарювальна камера:

- 1 – камера; 2 – герметизована кришка; 3 – механізм відкриття кришки;
- 4 – системи паропостачання, вентиляції і рециркуляції

Верхня і нижня рами каркасу кришки мають фігурний паз для розміщення гумового профільного ущільнювача спеціального перерізу. Замикаючий пристрій, опорну раму якого замоноличують в бетон корпусу камери, має трубчасту рейку з прямокутними виступами і гідроприводи. Кришка закривається шляхом суміщення зубів рейки з робочими поверхнями парних упорів кришки й анкерів рами. Для герметизації камери у внутрішню порожнину ущільнювача подається стисну-





те повітря із тиском 0,5 МПа. Система автоматики контролює положення замикаючих пристроїв, підвищення тиску в прокладці і пуск пари в камеру. Після завершення циклу теплової обробки знижується спочатку тиск у камері, а потім в ущільнювачі, замикаючий пристрій відкривається і гідроциліндри піднімають кришку. Шарнірне з'єднання опорної рами і кронштейнів кришки дозволяють повертати її на 95°. Оптимальна швидкість нагрівання камери складає 60°C/год (у порівнянні з 30°C/год у звичайних камерах), тривалість обробки 5...6 год, витрата пари знижується на 100...150 кг/м<sup>3</sup> бетону.

Ямні пропарювальні камери працюють за циклом 10...14 год. Цикл включає час на завантаження, розігрів виробів, ізотермічну витримку при максимальній температурі, охолодження і вивантаження виробів. Питома витрата пари в ямних камерах коливається в залежності від їх стану, системи паропостачання, виду пропарюваних виробів тощо. Середня питома витрата пари складає 250...300 кг/м<sup>3</sup> бетону. В добре обладнаних і правильно експлуатованих камерах питома витрата пари може бути знижена до 130...150 кг/м<sup>3</sup> бетону.

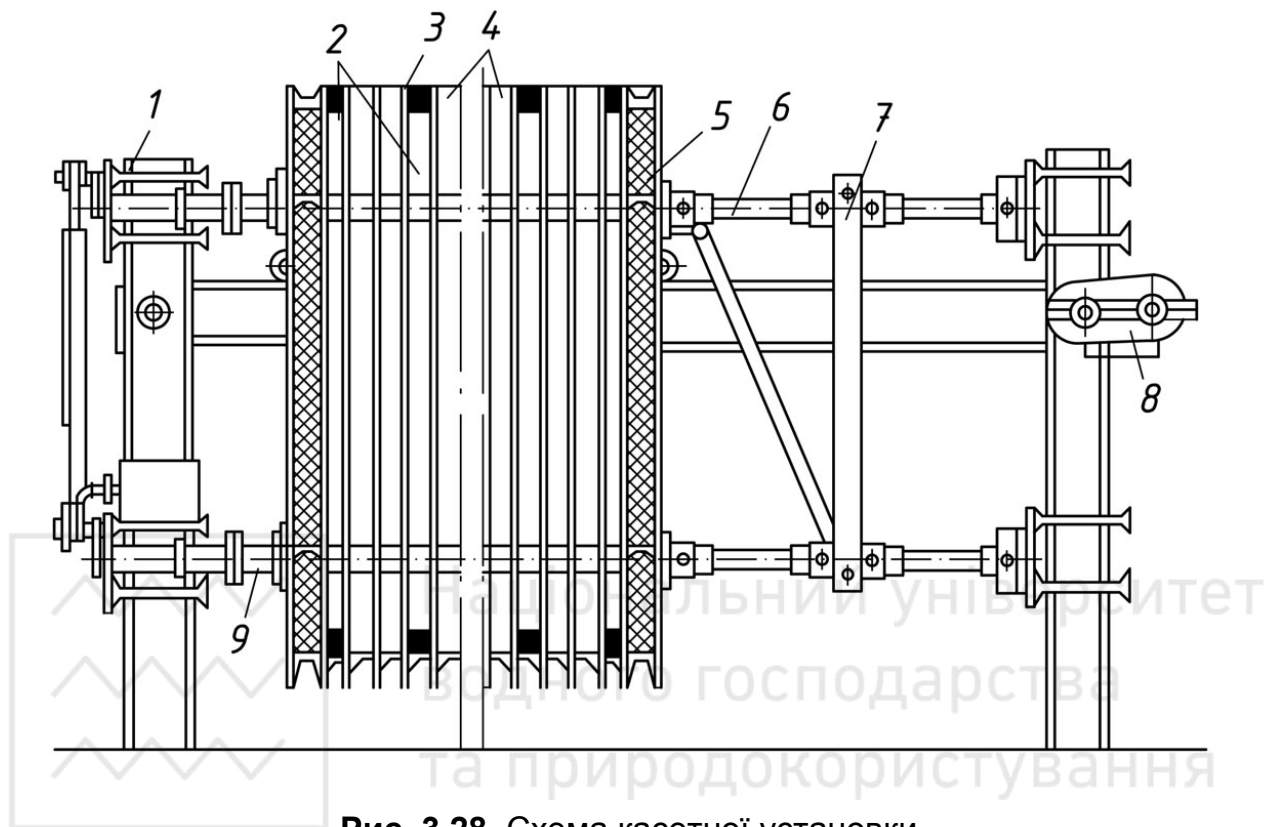
### **3.12.2. Касетні установки**

Касетні установки поєднують у собі установки для формування і тепловологісної обробки виробів, що обумовлює значну економію виробничих площ. Бетонні і залізобетонні вироби (плоскі, ребристі) формують і прогривають у вертикальних збірно-розбірних формах. Оскільки тривала тепла обробка знижує продуктивність і ефективність касетного способу виробництва, то такі установки можуть використовуватись в двостадійній технології: формування і коротке прогривання у касетній установці, а закінчення процесу теплової обробки в камерах витримування.

Як формування, так і тепловологісна обробка здійснюються в касетах у вертикальному положенні. Маса сформованого бетону знаходиться в касеті в замкнутому просторі, що сприяє більш інтенсивній тепловологісній обробці. *Форма-касета* (рис. 3.28) складається з ряду відсіків, утворених сталевими вертикальними стінками, причому відсіки, використовувані для формування бетону, чергуються з відсіками для пари (парові або теплові відсіки). Крайні відсіки теплоізолюють. Бетон подають у відсіки 4 і після ущільнення піддають тепловій обробці. Для теплової обробки пару подають у відсіки 2 і прогривають із двох сторін відразу два вироби (односторонній прогрів), розділені



сталевою перегородкою 3. Можливий також варіант чергування одного формувального і одного парового відсіку – двосторонній прогрів (див. рис. 3.19).



**Рис. 3.28.** Схема касетної установки

1 – станина; 2 – відсіки для подачі пари; 3 – розділова стінка; 4 – відсіки для формування виробів; 5 – теплоізолюючі стінки; 6 – фіксуючі упори; 7 – механізм стиснення; 8 – приводний механізм; 9 – упорний гвинт

Теплові відсіки різних типів касет мають різні товщину і конструктивні особливості. Як правило, це жорсткі металеві конструкції товщиною 70...240 мм, що мають каркас і обшиті металевим листом товщиною 12...24 мм.

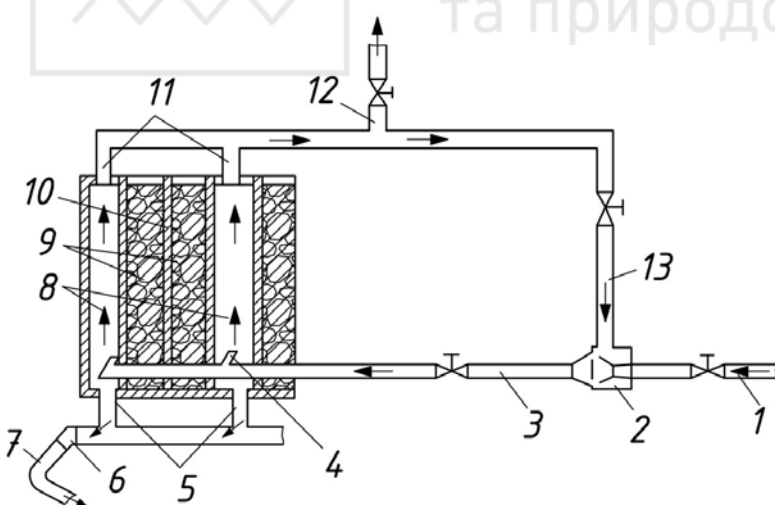
Теплоносій до теплових відсіків підводиться за допомогою гнучких шлангів, арматурний каркас і бетонна суміш подаються зверху. Вібрування бетону здійснюється навісними вібраторами. В більшості випадків в якості теплоносія використовують пару, однак можливе застосування гарячої води і високотемпературних теплоносіїв.

До недоліків касетних установок відноситься необхідність використання пластичних бетонних сумішей, оскільки високу вузьку щілину (формувальний відсік), у якій знаходиться арматурний каркас, заповнити жорсткою бетонною сумішшю й ущільнити неможливо. Застосування ж пластичних сумішей потребує зниження швидкості прогріву

вання, подовження циклу теплової обробки й обмеження температури нагрівання (не вище 100°C).

В переважній більшості конструкцій касетних установок теплової і формувальні відсіки розсовуються в горизонтальній площині. Значна висота формувального відсіку приводить до того, що нижні шари бетонної суміші знаходяться під надлишковим тиском і мають більш високі міцнісні показники (в 1,5...2 рази), ніж верхня частина виробу. З метою економії цементу застосовують бетонну суміш змінного складу, зі зменшенням витрати цементу для нижніх шарів.

Касетні установки відрізняються високою металоємністю (до 10 т металу на один виріб). Оскільки ці установки періодичної дії, то перш ніж почне прогріватися виріб, необхідно прогріти все бортоснащення. В касетних установках нерівномірність прогрівання виробу може мати місце по довжині (швидке прогрівання у зоні подачі пари і слабе надходження теплоносія в дальній торець через надлишок ребер жорсткості), по товщині (при односторонньому прогріві) і висоті (через розшарування теплоносія у вузькому високому відсіку). Тому важливого значення набувають організація теплообміну, рух і циркуляція теплоносія, що позначається на швидкості прогріву, витратах теплової



**Рис. 3.29.** Схема ежекторного паропостачання касетної установки:

1 – подача свіжої пари в ежектор; 2 – ежектор; 3 – дифузор; 4 – подача суміші пари і рециркуляту в парові відсіки; 5 – відбір конденсату; 6 – конденсатовідвідник; 7 – конденсатопровід; 8 – парові відсіки; 9 – вироби; 10 – прокладка; 11 – відбір пароповітряної суміші з парових відсіків; 12 – трубопровід з вентилем для випуску частини відпрацьованого теплоносія в атмосферу; 13 – подача пароповітряної суміші (рециркуляту) в ежектор

енергії і експлуатаційних характеристиках виробів.

Як відомо, інтенсивність теплообміну залежить від швидкості руху і турбулізації теплоносія. Тому передбачають циркуляцію, багаторазове використання і багатоходовий рух теплоносія у відсіках.

Однією з найбільш розповсюджених схем паропостачання касетних установок є *ежекторна система* (рис. 3.29). Застосування ежектора дозволяє організувати циркуляцію теплоносія через тепловий відсік, зменши-



ти нерівномірність прогріву виробів, заощаджувати теплову енергію, багаторазово використовуючи теплоносії.

Пара з високою температурою з магістрального паропроводу 1 через вузол регулювання потрапляє в ежектор 2. В ежекторі, що має сопло, конфузор і дифузор, створюється розрідження і охолоджена пароповітряна суміш з теплових відсіків 8 через гумові шланги і колектори 11, 13 підсмоктується в ежектор. Змішуючись зі свіжою парою і підвищивши температуру, теплоносії через подаючий колектор 4 надходить у теплові відсіки 8, прогріваючи формувальні відсіки 9 з виробами. Охолоджена пара конденсується і по гумових шлангах стікає в колектор збору конденсату 6 і далі в конденсатопровід 7.

Прогрівання виробів у касетних формах може здійснюватися відразу після закінчення формування, без попереднього витримання. Для прискорення прогрівання і скорочення тривалості теплової обробки доцільно бетонну суміш укладати в попередньо підігріту до 40...45°C форму. В цьому випадку тривалість підйому температури у відсіках форм до максимальної може бути скорочена до 1...1,5 год.

Тривалість ізотермічного прогрівання залежить від температури і розташування теплових відсіків, товщини виробів і складу бетону (розрахункові режими теплової обробки в касетних формах виробів з важкого бетону на портландцементі для досягнення відпускної міцності наведені в табл. 7.2).

Охолодження виробів після припинення подачі пари відбувається досить повільно через велику теплоємність касети з виробами, тому розпалублення виробів здійснюють при температурі 75...80°C. Для зниження температури в тепловому відсіку застосовують примусове охолодження водою.

Для збільшення оборотності касетних форм доцільно робити розпалубку виробів при міцності бетону 50...60% від проектної, що достатня для транспортних операцій. Подальше твердіння виробів може здійснюватися на теплом складі або на утеплених стелажах.

Прискорити процес твердіння бетону можна також шляхом введення хімічних добавок – прискорювачів твердіння. Найбільше скорочення термінів твердіння може бути досягнуто попереднім електропрогріванням бетонної суміші і наступним короткочасним прогріванням бетону в касетній формі при температурі 95...100°C.

Підвищення температури ізотермічного прогрівання вище 100°C пов'язано з підвищенням тиску у відсіках (при застосуванні пари як теплоносія) і для плоских виробів з великою поверхнею вимагає знач-



ного посилення каркаса відсіків. В цих випадках раціональніше застосувати високотемпературні теплоносії, що мають температуру кипіння 250...350°C. Питомі витрати пари в касетних установках в залежності від тривалості циклу, стану касет і якості експлуатації складають 150...250 кг пари на 1 м<sup>3</sup> бетону.

### **3.12.3. Стенди формування і паропрогріву**

Стендовий спосіб виробництва застосовують для виготовлення крупнорозмірних виробів, при виготовленні яких не можна використувати пересувні форми. При цьому способі вироби формують безпосередньо на стенді, що представляє собою ямну камеру малої глибини, на дні якої встановлена залізобетонна плита товщиною 120...200 мм.

В *стендах із гріючим дном* в плиті на глибині 50...70 мм від поверхні встановлені обігрівальні труби діаметром 25...32 мм, по яких проходить пара або гаряча вода. Знизу, під плитою, знаходиться теплоізоляційний шар сухого шлаку товщиною 300...400 мм. Подова плита має гідроізоляцію.

Після формування виробу на стенді під кришку підводять пару. Витрата пари при тепловологісній обробці на стендах, у порівнянні з обробкою в пропарювальних камерах, підвищена (400...1000 кг/м<sup>3</sup>) за рахунок збільшення втрат теплоти в навколишнє середовище через великі огорожувальні поверхні.

Огорожувальні конструкції (підлога, стіни, кришку) для зменшення втрат у навколишнє середовище необхідно покривати паро- і гідроізоляцією, а по периметру стін влаштовують гідрозатвор для запобігання вибивання пари. Підлогу стенда виконують з ухилом для стоку конденсату в злив, що обладнаний гідрозатвором і підключений до загальної системи скидання конденсату. Конструкція кришки стенда повинна мати необхідну жорсткість щоб уникнути перекосів.

Найбільш ефективні системи паропостачання стендів, що забезпечують інтенсивну циркуляцію гріючого середовища. Оскільки камери в стендах мають малу глибину, то циркуляцію забезпечують по горизонтальному контуру, тобто парові стояки стоять вертикально в кутах камери, а напрямок соплової подачі пари – горизонтальний, вздовж стін.

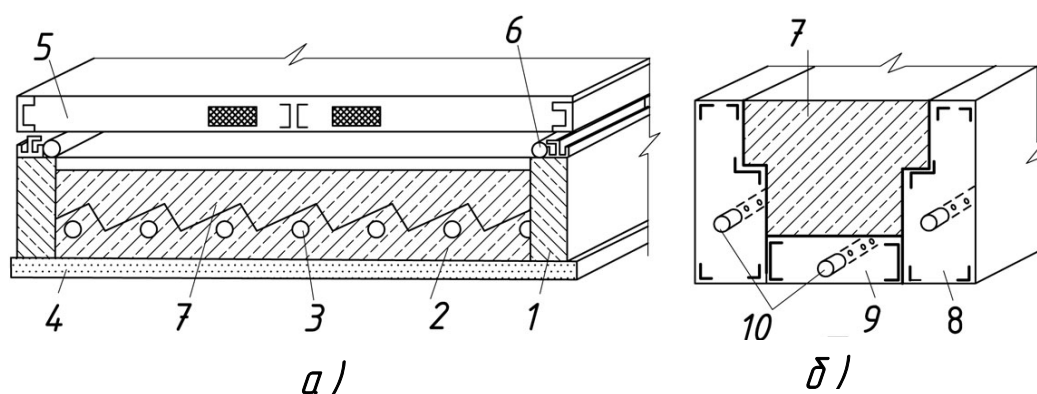




Одним із варіантів теплової обробки виробів на стендах є покриття їх *ковпаками* або *кришками*, під які подають "гостру" пару. Міцність ковпаків забезпечується металевим каркасом, до якого кріпиться дерев'яна обшивка й утеплення зі шлаковати або іншого теплоізоляційного матеріалу. Розміри ковпаків відповідають розмірам виробу, що прогрівається; відстань від поверхні виробу до кришки і стінок ковпака повинне бути не менше 50 мм. Щільне прилягання ковпаків до форм або площадки забезпечується пружними брезентовими або гумовими підкладками, що пришиті по всьому периметру опорних кромek. Жорсткі каркасні ковпаки при виготовленні виробів на стендах, що підігріваються, можна замінити покриттями з двох шарів брезенту або поліамідної плівки з прошарком із мінеральної вати.

Днища стендів і матриць утеплюють шаром керамзитового гравію; гідроізоляцію здійснюють двома шарами бутилкаучукової плівки по захисній стяжці з цементно-піщаного розчину товщиною 4...5 см.

При виготовленні *виробів складної конфігурації* застосовують сталеві або залізобетонні *матриці*. Так, при виробництві сходових маршів використовують залізобетонну матрицю (рис. 3.30). Форма для виробу утворюється бічними огорожувальними конструкціями 1 і залізобетонною основою 2 із вмонтованими нагрівальними трубами 3. Під основою 2 влаштована шлакова або керамзитова теплоізоляція 4. Пара через паропровід 6 подається під ковпак або кришку 5, конденсат видаляється через патрубок.



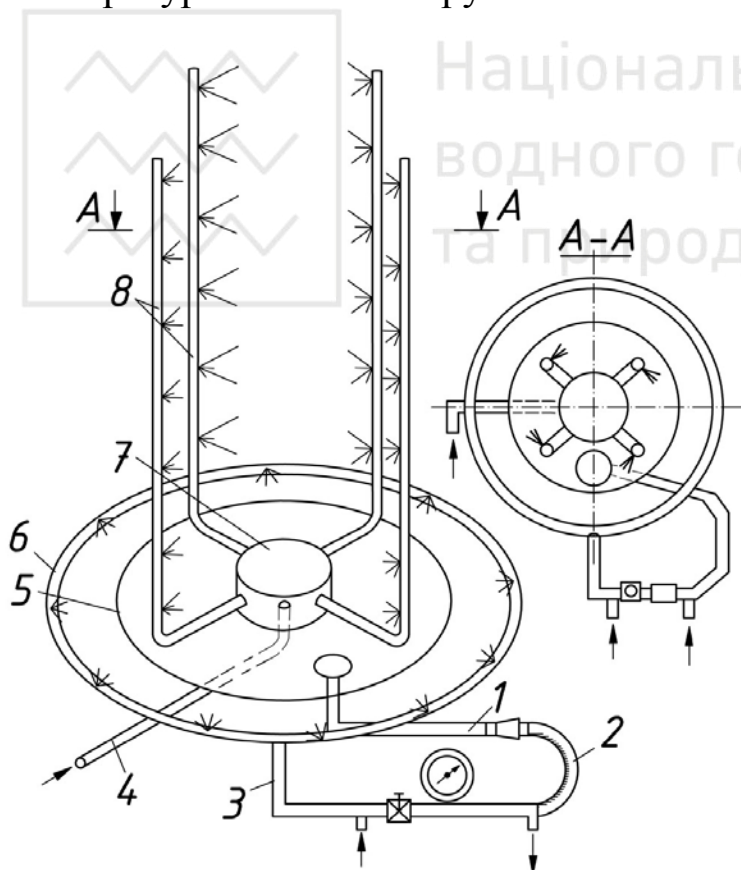
**Рис. 3.30.** Матриця (а) і термоформа (б) для виготовлення виробів складної конфігурації

1 – огорожувальні стінки; 2 – залізобетонна основа; 3 – нагрівальні труби; 4 – теплоізоляційний шар; 5 – кришка; 6 – паропровід; 7 – виріб; 8 – бічні стінки; 9 – піддон; 10 – штуцери і перфоровані труби пароподачі



Для виготовлення крупнорозмірних виробів (прольотних мостових конструкцій) використовують *тунельні камери паропрогріву періодичної дії*. Камери бувають прохідними (із двома дверима) і *тушковими* (одні двері), двері в них виконані з металевого каркаса, обшиті листовим металом і теплоізовані, а також герметизовані прокладками з термостійкої гуми і спеціальними затискачами. Пара подається по довжині камери перфорованими трубами, днище має ухил для стоку конденсату. Камера має висоту і ширину 1,8...2,0 м і довжину до 25 м. Вироби подаються в камеру по рейковому шляху на пересувному стенді.

При виробництві *віброгідропресованих труб* теплова обробка здійснюється за стендовою технологією шляхом подачі насиченої пари в порожнину сердечників форм. Однак цей спосіб прогріву виробів характеризується високою тривалістю (10...16 год.), нерівномірністю температури по висоті труб і значною витратою теплової енергії, що



**Рис. 3.31.** Пристрій для теплової обробки віброгідропресованих труб:

1, 4 – відповідний і подавальний патрубки; 2 – шланг; 3 – паропровід; 5 – днище; 6 – перфорований колектор "кільце"; 7 – лійка; 8 – перфоровані труби

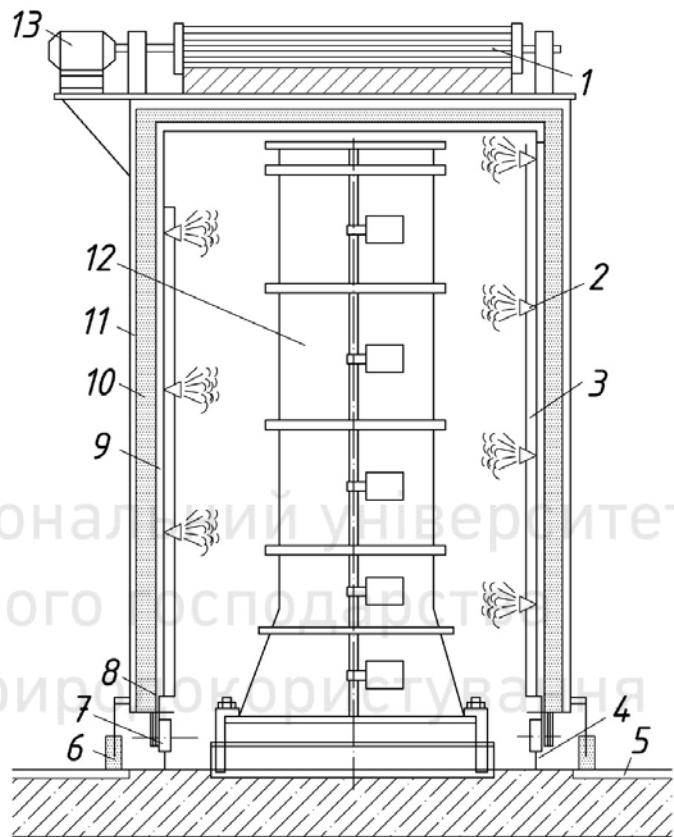
перевищує нормативну в 1,5...2,5 рази. Один з найбільш простих способів підвищення ефективності теплової обробки полягає в герметизації порожнини сердечників кришкою. Всередині порожнини встановлюють плоскі діафрагми, виконані у вигляді пластин із щілинними отворами біля країв, площа яких для забезпечення рівномірного прогрівання труб по висоті зменшується в кожній наступній по висоті діафрагмі. Гостру пару в порожнину сердечника подають спрямованими на поверхню теплообміну інтенсивними обертливими струменями, що витікають зі спеціального па-



ророзподільного пристрою, виконаного у вигляді декількох перфорованих труб (рис. 3.31). В зоні витікання парових струменів виникає інтенсивний вихровий потік гострої пари, що обертається з великою швидкістю по поверхні сердечника форми і руйнує плівку конденсату, розприскуючи і здуваючи її.

Для теплової обробки виробів застосовується також установка, в якій паровий ковпак має П-подібну форму і розташований на роликівих опорах, по торцях обладнаний шторними завісами з приводами (рис. 3.32). В даній установці можна одночасно піддавати тепловологісній обробці декілька труб.

Виробництво залізобетонних напірних труб – одне з найбільш металоємних, що обумовлено експлуатацією форм з одноразовою оборотністю за добу. При цьому середня продуктивність одного поста не перевищує 0,07...0,15 м<sup>3</sup>/год. Однією з причин, що ускладнює випуск даного типу виробів, є велика тривалість теплової обробки, характерна для застосовуваного одностороннього паропрогріву.



**Рис. 3.32.** Пересувна пропарювальна камера для термообробки віброгідропресованих труб:

1 – барабан; 2 – сопла; 3 – подавальний паропровід; 4 – рейка; 5 – основа; 6 – гідрозатвор; 7 – колесо-коток; 8 – швелер; 9, 11 – внутрішня і зовнішня обшивки ковпака; 10 – теплоізоляція; 12 – труба; 13 – електродвигун; 14 – П-подібні рами; 15 – шторна завіса

#### **3.12.4. Термоформи**

Контактне прогрівання бетонних і залізобетонних виробів здійснюється в **термоформах** через днища і стінки форми, а в герметично закритих формах – і через кришку форми. Жорсткі конструкції піддону і бічних стінок обшивають металевим листом і герметизують, а в порожнини, що утворилися, через штуцери підводиться теплоносій; у від-



сіки теплоносій може бути поданий за допомогою перфорованих труб. Для рівномірного розподілу теплоносія і його циркуляції в ребрах жорсткості роблять круглі або овальні отвори діаметром не менше 100 мм.

В якості теплоносія використовують пару, воду, високотемпературні теплоносії (наприклад, оливу, дитолілметан). Можливо також застосування електроенергії, для чого в порожнинах установлюють трубчасті або плоскі електронагрівачі. Температура в теплових відсіках може досягати 130...140°C, що інтенсифікує процес і скорочує тривалість теплової обробки. При використанні пари як теплоносія передбачають систему видалення конденсату і для полегшення його стоку форму встановлюють з ухилом 1...2°.

Застосування термоформ дозволяє зменшити частку непродуктивних витрат теплоти на прогрівання вільного простору й огорожень теплових установок, а теплоізоляція термоформ зменшує втрати теплоти в навколишнє середовище.

При виробництві залізобетонних виробів можна застосовувати стаціонарні і пересувні термоформи. Стаціонарні термоформи (див. рис. 3.30, б) застосовують, як правило, для виготовлення крупнорозмірних виробів. Постійно підключені до теплової мережі, ці форми мають нерухомий піддон і борти, що відкидаються. Вібрування здійснюють за допомогою навісних або глибинних вібраторів. При використанні індивідуальних термоформ особливу увагу варто звернути на гідро- і теплоізоляцію відкритих поверхонь виробів щоб уникнути нерівномірного прогрівання і зниження експлуатаційних характеристик виробів, що може викликати підвищену пористість і водопоглинання виробу, низьку морозостійкість.

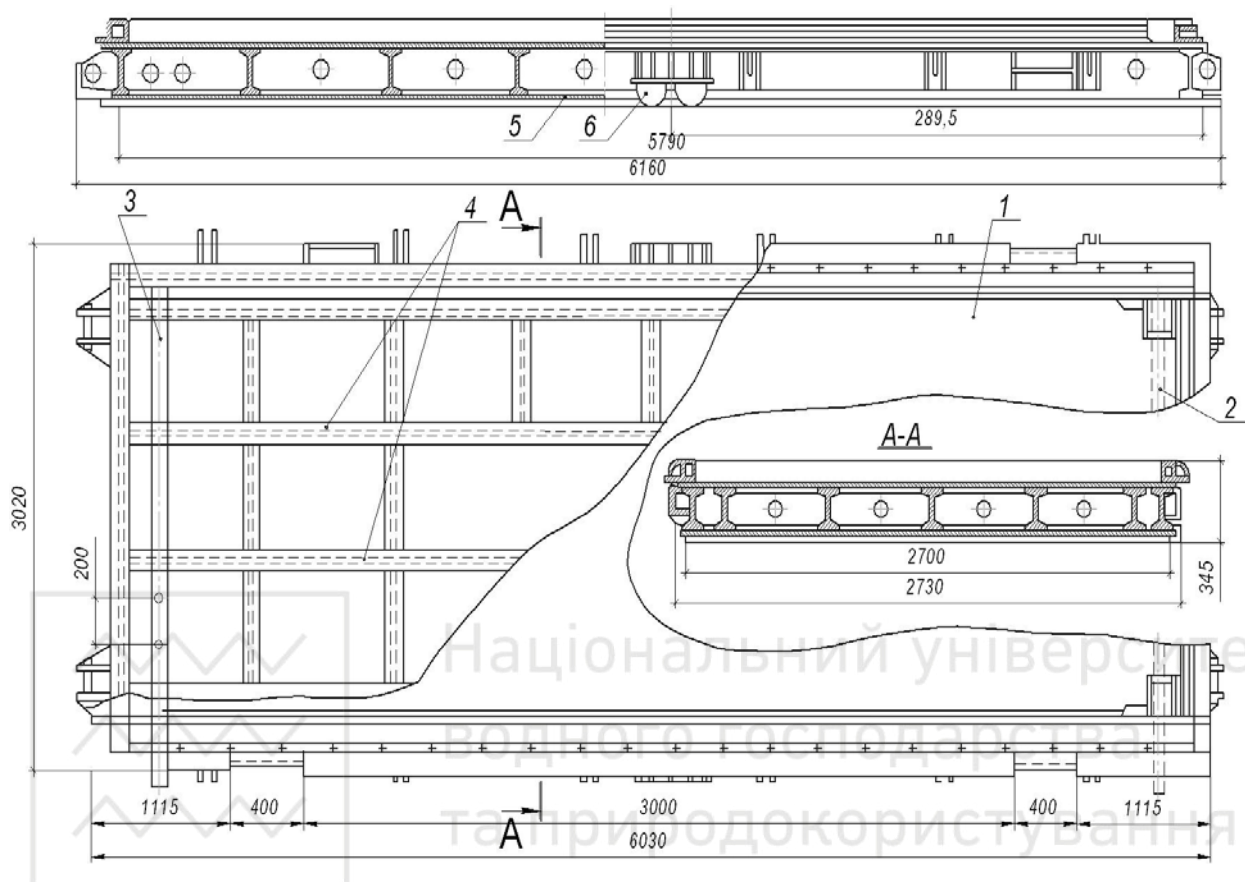
Широке поширення одержали пересувні плоскі термоформи: вертикальні, які застосовують в касетних установках (див. п. 3.12.2), і горизонтальні – в пакетувальниках.

*Горизонтальні термоформи* мають нагрівальний піддон і теплоізолювані відкидні борти (рис. 3.33). Рамна конструкція форми 4, що забезпечує її жорсткість, герметизована днищами форми 1 і термовідсіку 5. Пара розводиться по відсіках перфорованим трубопроводом 3; конденсат стікає по ухилу і через конденсатопровід 2 видаляється з форми.

Горизонтальні термоформи забезпечують високу рівномірність прогрівання; незначна товщина піддону (у порівнянні з висотою пропарювальної камери) виключає розшарування теплоносія. При використанні цих термоформ з'являється можливість механізувати техно-



логічний процес, а при установці їх у пакет значно заощаджується виробнича площа цеху.



**Рис. 3.33.** Горизонтальна термоформа:

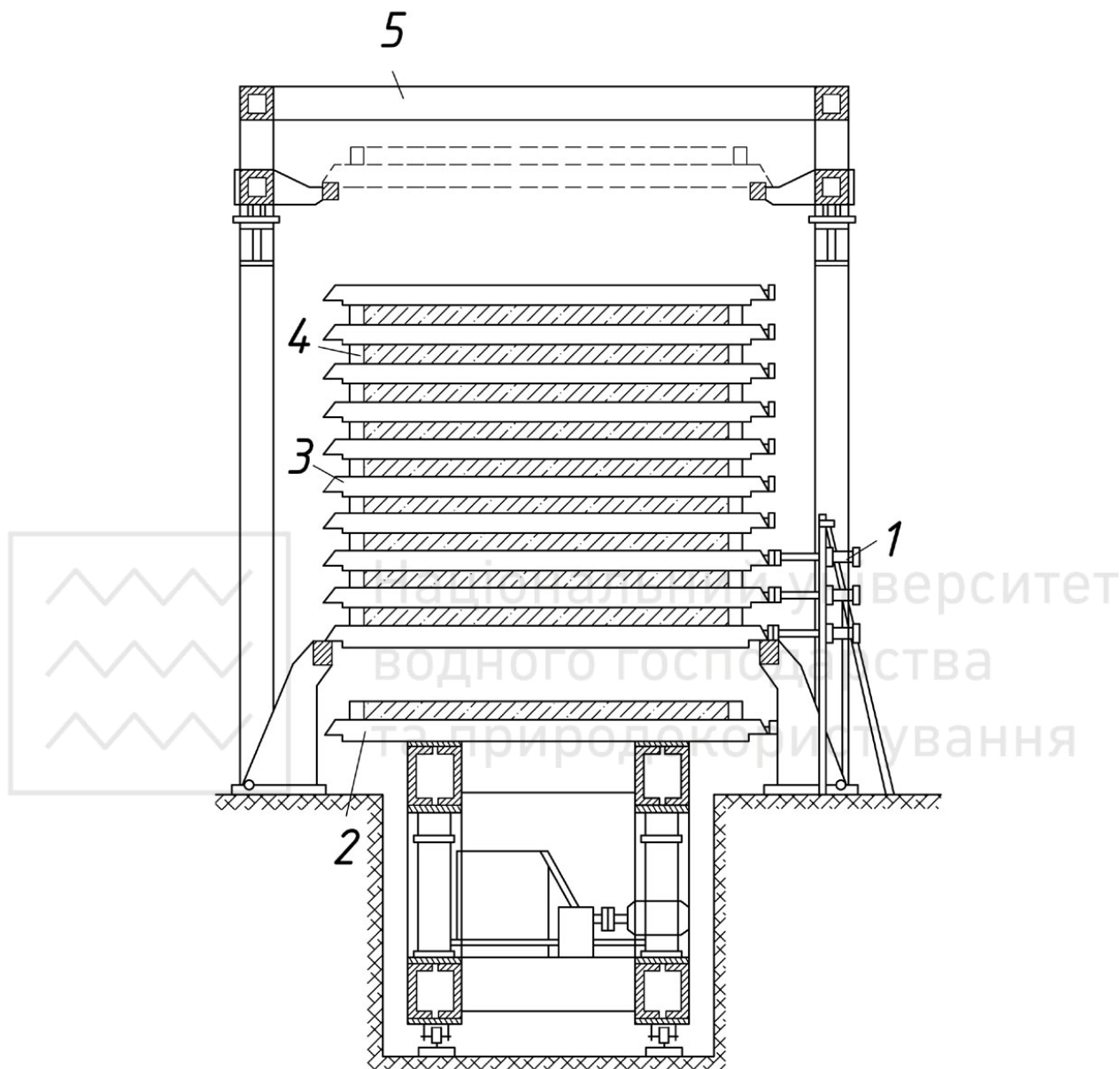
1 – днище форми; 2 – конденсатор; 3 – перфорований паропровід; 4 – рама конструкція форми; 5 – днище термовідсіку; 6 – фіксуючий пристрій

В пакетувальнику (рис. 3.34) виріб, раніше відформований в термоформі, механічним або гідравлічним приводом піднімається і притискається до днища раніше піднятої і утримуваної кронштейнами термоформи.

В установках *неперервної дії* вверху на один виріб пересувається весь пакет. Верхня термоформа з виробом, пройшовши весь цикл теплової обробки, за допомогою передаточного візка подається на пост розпалубки. Конструкції пакетувальників дозволяють зібрати в пакет від 6 до 10 термоформ. Теплоносій в установках *періодичної дії* за допомогою гнучких шлангів подається в кожен тепловий відсік, а в установках *неперервної дії* – автоматичними клапанами. Привід автоматичних клапанів зблокований із приводом столу-підйомника; в про-



цесі пересування форми в верх пара відключається і знову підключається після установки форм у фіксоване положення.



**Рис. 3.34.** Пакетувальник:

1 – автоматичні клапани подачі пари; 2 – стіл-підйомник; 3 – термоформи; 4 – виріб; 5 – передаточний візок

*Паропостачання термоформ здійснюється в наступний спосіб (рис. 3.35). Пара, що надходить по магістральному паропроводу 8 через витратомір 7 і вузол керування 6 з регулюючими пристроями подається в колектор 5, з якого підводиться до автоматичних клапанів 2. Автоматичні клапани за допомогою пневмоциліндрів 4 притискаються до прийомних конусів пакета термоформ 1, відкриваючи прохід і*



пропускаючи пару у відсіки; при зворотному русі пневмоциліндрів клапани відходять від термоформ, автоматично перекидаючи подачу пари. Парова гребінка 3 з вентилями дає можливість при необхідності здійснювати ручне підключення термоформ через гнучкі шланги. Аналогічно влаштована система видалення конденсату: через автоматичні клапани для видалення конденсату 9, колектор 10 і конденсатопровід 11 конденсат надходить у конденсаційні горщики, звідки його подають у котельну установку.

При установці термоформ в пакет без прокладок виріб прогривається з двох сторін: від днища форми і днища верхнього термпіддону. До останнього (верхнього) виробу теплоносій не подають і виріб починає охолоджуватись. Продовження охолодження відбувається під час руху виробу на пост розпалубки. Загальна тривалість теплової обробки складає 6...8 год при витраті пари 200...250 кг/м<sup>3</sup>.

### 3.12.5. Автоклавні установки

Автоклавні установки призначені для тепловологісної обробки бетонних, залізобетонних і силікатних виробів у середовищі з надлишковим тиском.

Наявність надлишкового тиску середовища на початку теплової обробки і зростаюча відносна вологість пароповітряного середовища в процесі її сприяють підвищенню фізико-механічних властивостей бетону, що твердіє, скороченню тривалості обробки і зменшенню витра-

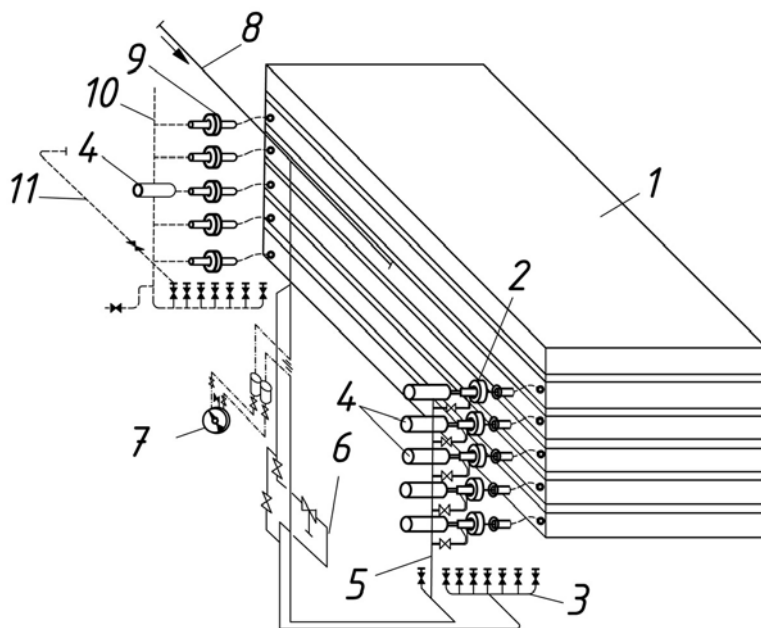


Рис. 3.35. Схема паропостачання пакетувальника:

1 – пакет термоформ; 2 – автоматичні клапани; 3 – парова гребінка; 4 – пневмоциндри; 5 – паровий колектор; 6 – вузол регулювання; 7 – витратомір; 8 – паропровід; 9 – клапани для видалення конденсату; 10 – колектор конденсату; 11 – конденсатопровід

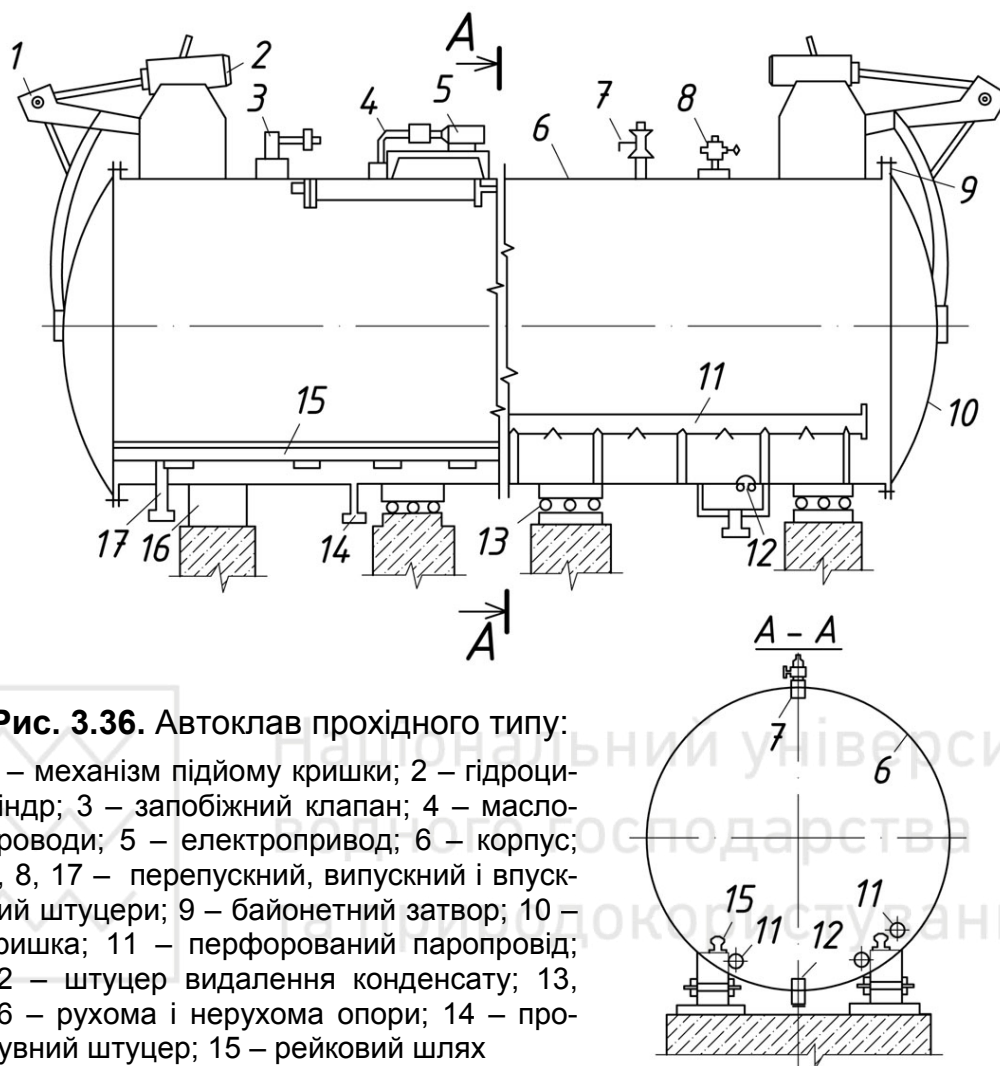


ти цементу. Підвищений тиск у сполученні з високою температурою активізують реакції гідратації в'язучих; формування структури щойно укладеного бетону проходить в сприятливих умовах при постійно діючому тиску. Під впливом тиску у виробі відбувається обтиснення поверхневих шарів матеріалу, що підвищує міцнісні властивості бетону, що, в свою чергу, підвищує морозостійкість і зменшує водопоглинення. Автоклавний спосіб обробки дозволяє одержувати високоякісні вироби навіть при застосуванні низькомарочних цементів або місцевих в'язучих, а також теплоізоляційні матеріали (пінобетони, ніздрюваті бетони).

Робочий надлишковий тиск в автоклавах може приймати наступні значення 0,8; 1,2; 1,6; 2,5 МПа. Оптимальні значення температури середовища і тиски при ізотермічному витримуванні і його тривалості залежать від виду в'язучого: при застосуванні в'язучих на основі вапна і портландцементу вони знаходяться в межах 1,2...1,6 МПа, а для деяких техногенних продуктів (наприклад нефелінового цементу) – 1,6...2,5 МПа.

**Автоклав** (рис. 3.36) представляє собою сталеву циліндричну посудину, яка герметично закривається, діаметром 2,6 або 3,6 м і довжиною 17...21 м. Автоклав, що обладнаний однією кришкою називається *тупиковим*, двома – *прохідним*. Масивний сталевий корпус *б* з товщиною стінок 20...30 мм може витримувати високий тиск. Він установлений на одній нерухомій опорі *1б* і декількох рухомих опорах *1з*, що дозволяє йому переміщуватися при нагріванні і охолодженні. Автоклав має механізми підйому кришок *1* і байонетні затвори *9*, що забезпечують його герметичність. Притискання байонетних кілець і підйом кришок здійснюється гідравлічною системою, що складається з електропривода *5* насосної станції, маслопроводів *4* і гідроциліндрів *2*. Завантаження виробів в автоклав виконують візками за допомогою перехідного містка, що з'єднує рейковий шлях у цеху з рейками *15* середині автоклава. Ширина колії 900 і 1524 мм відповідно до діаметрів автоклава 2,6 і 3,6 м.

*Система паропостачання* автоклава складається з наступних елементів: продувний *14*, впускний *17*, пропускний *7*, випускний *8* штуцери з регулюючою і запірною арматурами; система видалення конденсату, приєднана до штуцера *12*; запобіжний клапан *3*. Пара в автоклаві розподіляється сопловою подачею або через перфорований паропровід *11*; режим подачі пари регулюється програмним регулятором температур.



**Рис. 3.36.** Автоклав прохідного типу:

1 – механізм підйому кришки; 2 – гідроциліндр; 3 – запобіжний клапан; 4 – маслопроводи; 5 – електропривод; 6 – корпус; 7, 8, 17 – перепускний, випускний і впускний штуцери; 9 – байонетний затвор; 10 – кришка; 11 – перфорований паропровід; 12 – штуцер видалення конденсату; 13, 16 – рухома і нерухома опори; 14 – продувний штуцер; 15 – рейковий шлях

Продуктивність автоклава характеризується тривалістю циклу роботи і кількістю продукції, що завантажується. Тому прагнуть максимально збільшити число виробів на вагонетках. Відношення об'єму завантаженого матеріалу в автоклав до об'єму автоклава називають коефіцієнтом заповнення  $K$ . Цикл роботи автоклава складається з часу на завантаження і вивантаження виробів, а також на їх теплову обробку.

Теплова обробка поділяється на періоди: період підйому температури, період ізотермічної витримки (у ці періоди в автоклав подається пара) і період охолодження, коли пара з автоклава поступово видаляється. Після охолодження відкривають кришки, потяг з готовою продукцією з автоклава викочується, автоклав піддається чищенню, і цикл повторюється. Загальна тривалість циклу роботи автоклава для



різних матеріалів складає 12...18 год. *Розрахункові режими автоклавної обробки ніздрюватих бетонів наведені в табл. 7.9-7.10.*

Перед початком роботи автоклав необхідно продувати парою для видалення повітря, яке суттєво знижує інтенсивність теплообміну. В перший період обробки відбувається прогрівання виробів до температури 100°C при інтенсивній конденсації пари на výroбах і стінках автоклава; в другий період температура і тиск підвищуються до прийнятого максимального значення, що супроводжується прогріванням і обтисненням бетону. Після періоду ізотермічного витримування, тривалість якого пов'язана з товщиною виробу, видом матеріалу і величиною тиску, настає період охолодження. Він найбільш небезпечний через можливе порушення структури матеріалу. Так, при зниженні тиску в автоклаві в матеріалі деякий час зберігається максимальний тиск і виникаючий градієнт тиску може перевищити допустимі значення. При цьому різке зниження тиску в середовищі може привести до того, що волога, яка знаходиться у виробі, виявиться перегрітою і відбудеться бурхливе скипання по всьому об'єму виробу. Тому зниження тиску і температури відбувається ступінчато із проміжними витримуваннями для вирівнювання тисків і температур по об'єму виробу.

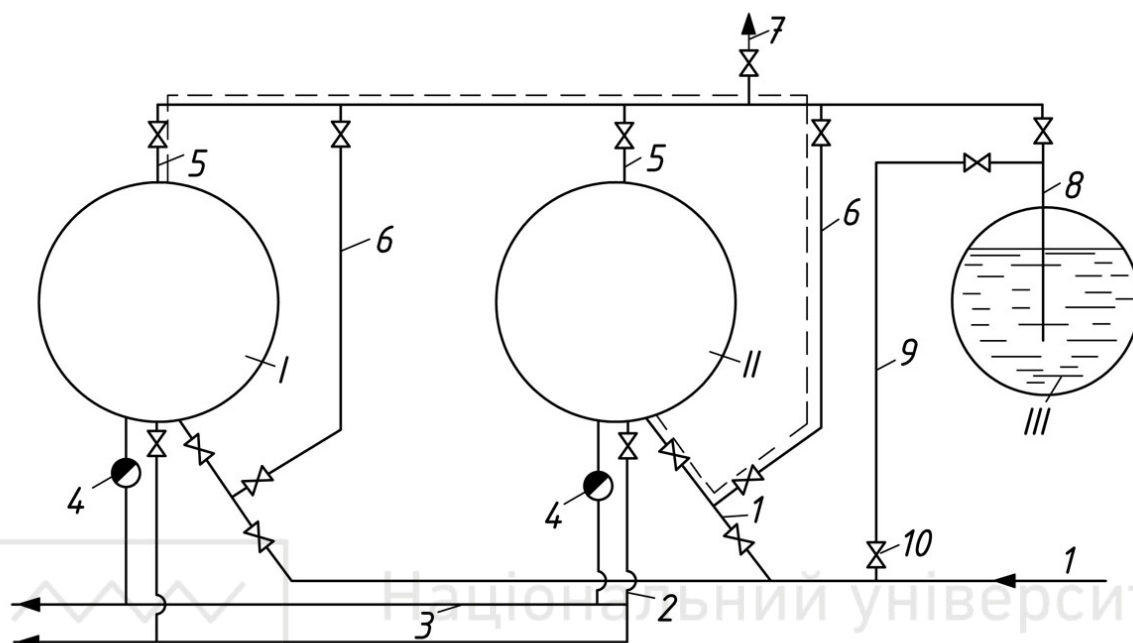
В деяких випадках після зниження тиску до атмосферного роблять *вакуумування*. Вакуумування крупнорозмірних виробів з ніздрюватого бетону в період охолодження після досягнення атмосферного тиску дає можливість знизити вологість виробів і прискорити їхнє охолодження без втрати міцності. Вакуумування також створює додатковий градієнт тиску в тілі виробу, що обумовлює рух вологи від центру до периферії і необхідне зневоднювання ніздрюватого бетону.

Після відкриття кришки або вивантаження виробів з автоклава виробу необхідно витримувати в умовах цеху, оскільки всередині їх ще досить висока температура і процес охолодження бетону продовжується.

Для зниження енергоємності процесу автоклавної обробки застосовують *перепуск пари* з автоклава, де закінчена ізотермічна витримка, в інший автоклав, де відбувається підйом температури. Іноді встановлюють в якості додаткової ємності старий автоклав (паровий акумулятор), і пара, якщо її нікуди перепускати, подають в дану ємність, а при необхідності перекачують в автоклав.



Схема паропостачання двох автоклавів з паровим акумулятором показана на рис. 3.37. За такою схемою автоклави працюють наступним чином.



**Рис. 3.37.** Схема паропостачання двох автоклавів з паровим акумулятором:

I, II – автоклави; III – паровий акумулятор

По системі паропроводів *1* подається робоча пара із котельні. Ця система має підведення до кожного автоклава, позначені відповідно *I* і *II*. Система *3* передбачає видалення конденсату з кожного автоклаву через конденсатовідвідний пристрій *4* у конденсаційну мережу. Система *2* служить для приєднання автоклавів до вакуум-насоса. Система *5* призначена для відбору пари з автоклавів і передачі її або в паровий акумулятор, або на перепуск в інший автоклав, або для викидання відпрацьованої пари в атмосферу через трубопровід *7*. Система *6* служить для перепуску пари в автоклави. Призначення системи *8* – передавати пару в ємність-акумулятор *III* або для відбору з акумулятора. Система *9* служить для зарядки акумулятора. Всі системи обладнані вентилями *10*.

Наприклад, щоб з автоклава пару передати в паровий акумулятор, діють наступним чином. В неї закачують деяку кількість гарячої води, і трубу, по якій йде перепуск пари, опускають в гарячу воду. Пара при цьому конденсується, а її об'єм зменшується майже в 10 разів. Таким



чином, в ємності-акумуляторі знаходиться конденсат під певним тиском. При передачі цього конденсату в завантажений автоклав він (попадаючи в середовище з меншим тиском) знову закипає, перетворюючи в пару. Такий перепуск пари дає можливість заощаджувати до 10...15% свіжої пари.

З огляду на те, що в автоклаві підтримується високий тиск, ці установки відносять до агрегатів підвищеної небезпеки. Питома витрата пари в автоклавах порівняно велика і складає 300...400 кг/м<sup>3</sup> щільних виробів.

### 3.13. ТЕПЛОВІ УСТАНОВКИ НЕПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

Конвеєрна технологія виробництва збірного залізобетону викликала появу і теплових установок неперервної дії: щілинних, полігональних, тунельних і вертикальних камер а також пакетувальників (розглядалися вище).

На відміну від періодично діючих камер, де підйом температури, а потім ізотермічна витримка і охолодження здійснюються послідовно в часі в одній камері, щілинні пропарювальні камери по довжині розділяються на відповідні зони: зону підйому температури середовища, ізотермічної витримки і охолодження. В першу і другу підводиться тепла енергія, третя зона – зона охолодження, теплом не забезпечується, а навпаки, вентилується холодним повітрям. Поділ камери на функціональні зони дозволяє заощаджувати теплову енергію за рахунок витрат теплоти на нагрівання конструкцій після кожного циклу в порівнянні з установками періодичної дії.

#### 3.13.1. Горизонтальні камери неперервної дії

В конвеєрній технології виробництва застосовують одно- або багатоярусні горизонтальні камери теплової обробки. Вироби, що знаходяться на піддонах-вагонетках, проходять тепловологісну обробку в камерах, розташованих паралельно формувальному конвеєрові на рівні підлоги цеху, нижче або вище її, а подаються в камеру відповідно передаточним візком, знижувачем або підйомником.

Вироби, що пройшли обробку в горизонтальних камерах неперервної дії, відрізняються рівномірністю обробки. На відміну від установок періодичної дії, вироби в таких камерах не проходять всі етапи обробки в одному місці, а переміщуються один за одним, послідовно й



в однакових умовах проходять усі зони. Границі зон, як і торці камер, перекривають повітряними завісами або гнучкими шторами для підтримки теплового режиму та економії теплоти.

Попереднє витримування виробу проходять після формування на шляху руху в камеру. Теплоносій подають у зони нагрівання й ізотермічного витримування; зона охолодження вентилується.

Горизонтальні камери неперервної дії економічні та ефективні. В таких камерах повністю механізовані процеси і автоматизований режим обробки, а також висока економія теплової енергії у порівнянні з установками періодичної дії за рахунок відсутності витрат на нагрівання конструкцій після кожного циклу обробки.

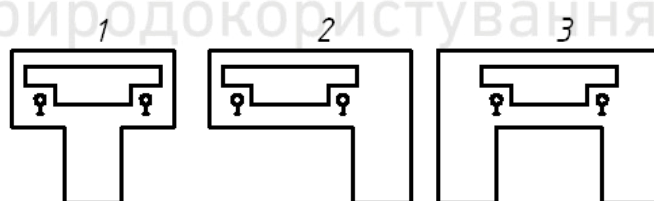
За конструкцією камери виконують *однорусними щілинними горизонтальними або полігональними і тунельними багатоярусними*.

### Щілинні камери.

*Щілинна однорусна камера* представляє собою горизонтальний тунель довжиною 60... 127 м і висотою 0,7...1,2 м, що визначається товщиною виробу з формою, висотою транспортних пристроїв і технологічним зазором. Ширина визначається, в першу чергу, шириною вагонетки (колії) але також залежить від влаштування технологічного проходу (рис. 3.38). З метою

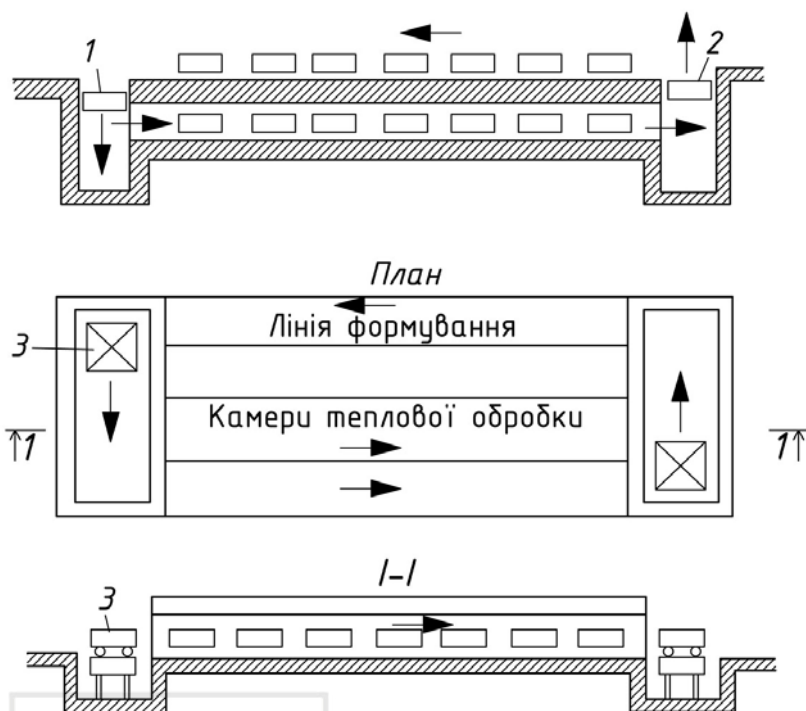
економії виробничих площ цеху такі камери розташовують нижче рівня підлоги цеху по одній осі з формувальною лінією (вертикально-замкнутий конвеєр) або на одному рівні із формувальним конвеєром (горизонтально-замкнутий конвеєр) (рис. 3.39). Можливий також варіант паралельного влаштування щілинних камер на різних рівнях із формувальним конвеєром (похило-замкнутий конвеєр) (рис. 3.40).

При вертикально-замкненому конвеєрі лінія формування виробів знаходиться над лінією теплової обробки. Формавагонетка з відформованими виробами подається штовхачем на стіл-знижувач, що опускає його до рівня рейок щілинної камери. Інший штовхач на столі-знижувачі просуває формувагонетку в камеру, пересуваючи весь ряд форм і виштовхуючи крайню на стіл-підйомник. Різний рівень ліній формування виробів і їх теплової обробки, необ-



**Рис. 3.38.** Схеми поперечних розрізів щілинних камер:

1, 2, 3 – варіанти влаштування технологічного проходу



**Рис. 3.39.** Варіанти поєднання щілинних камер із формувальними конвеєрами:

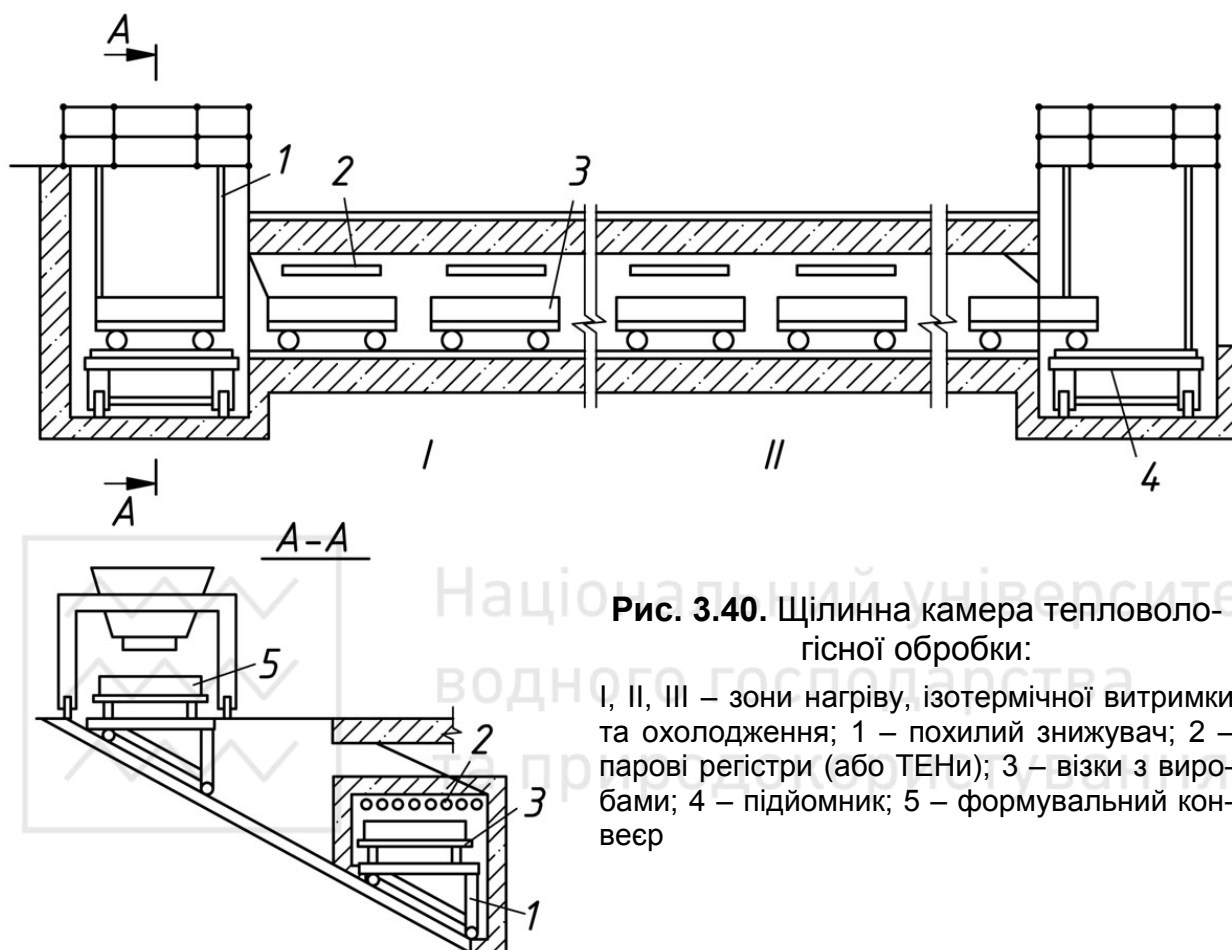
- а – вертикально-замкнений конвеєр; б – горизонтально-замкнений конвеєр;  
 1– стіл-знижувач; 2 – підйомник; 3 – передавальний візок

хідність наявності системи підйомника-знижувача (яка часто виходить з ладу) змушує іноді відмовитися від останніх і робити завантаження і вивантаження виробів за допомогою мостового крана. При цьому єдиний конвеєр розбивається на два самостійних: формування виробів і їх теплової обробки. Вони зв'язані між собою крановими операціями по завантаженню і вивантаженню виробів, що викликає затримки в роботі і порушує ритм виробництва.

Горизонтально-замкнений конвеєр поєднує наземну щілинну камеру теплової обробки, і лінію формування, які знаходяться на одному рівні (рівні підлоги цеху). Такий варіант дозволяє завантажувати і вивантажувати вироби без участі мостового крана і відмовитися від системи знижувачів-підйомників. Подають вироби в камеру і вивантажують з неї за допомогою передавальних візків, що не порушує єдності всього конвеєра виробництва. Недолік наземних камер – низький коефіцієнт корисного використання площі цеху, оскільки камери займають значну площу основного виробництва.

Схема щілинної камери теплової обробки похило-замкнутого конвеєра представлена на рис. 3.40. Візок (формавагонетка) 3 з виробом, пройшовши лінію формування і зону попереднього витримання, надходить на знижувач 1 і за допомогою лебідки разом зі знижувачем опускається на нижній рівень. Штовхачем вагонетка заштовхується в камеру. При цьому на довжину одного виробу пересувається весь потяг і остання вагонетка виходить на підйом-

ник 4. При вході в камеру і виході з неї встановлені механічні герметизуючі штори, що перешкоджають підсмоктуванню в камеру холодного повітря і вибиванню пароповітряної суміші.



**Рис. 3.40.** Щілинна камера тепловологісної обробки:

I, II, III – зони нагріву, ізотермічної витримки та охолодження; 1 – похилий знижувач; 2 – парові реєстри (або ТЕНи); 3 – візки з виробами; 4 – підйомник; 5 – формувальний конвеєр

Нагрівачі 2 встановлюються в зоні нагріву I і в зоні ізотермічної витримки II; їх кількість залежить від необхідної температури в зонах; довжина зон обумовлена тривалістю етапів теплової обробки.

В якості теплоносія застосовують: "гостру" пару, тобто безпосереднє стикання пари з поверхнею бетону; "глуху" пару – обігрів паровими реєстрами; електронагрівачі. При обігріві "гострою" парою її подають в двосторонні стояки з кроком 2...6 м, а потім через перфоровані труби або гребінки з встановленими на них соплами випускають в камеру. При цьому утвориться пароповітряна суміш, що конденсується на холодних виробках. В таких камерах необхідно передбачати ухили для стоку конденсату і пристрої для її збору. Витрата пари при обробці "гострою" парою складає 150...250 кг/м<sup>3</sup> бетону.





При тепловій обробці виробів з легких бетонів (наприклад стінових панелей з керамзитобетону, блоків із ніздрюватих бетонів) застосовують "глуху" пару, оскільки конденсат, який осаджується, підвищує вологість виробу. Кількість реєстрів, необхідних для зони нагріву, визначають з розрахунку теплового балансу і тепловіддачі одного реєстра. Реєстри здебільшого виготовляють із гладких труб діаметром 76 мм і довжиною 5 м; кількість труб у реєстрі коливається від 5 до 15 шт. і залежить від розмірів камери і місця установки. Для визначення тепловіддачі реєстра підраховують поверхню всіх труб у реєстрі, а потім розраховують необхідну кількість реєстрів. Витрата пари при такій обробці бетону складає 200...250 кг/м<sup>3</sup> бетону.

Використовують також *щільні камери з обігрівом електроенергією за допомогою ТЕНів* (див. п. 3.14.2). Трубчасті електронагрівачі довжиною 0,4...2,0 м і діаметром 6...18 мм мають потужність 0,5...5 кВт і температуру поверхні 400...800°C; живлення ТЕНів здійснюється від електромережі напругою 380 В. З'єднані в блоки по кілька штук для гнучкого регулювання температури, ТЕНи встановлюють на підлозі камери під вагонетками в зоні нагріву, починаючи з 5...10 м від завантажувального торця, а також у зоні ізотермічного витримування або під стелею. Загальна потужність ТЕНів камери близько 1000 кВт.

Теплову обробку з використанням ТЕНів застосовують для виробів з легкого і конструктивно-теплоізоляційного бетону. Витрата електроенергії складає 50...100 кВт·год/м<sup>3</sup>.

Температура середовища в камері в зоні установки блоків ТЕНів досягає 130...190°C, але виріб прогрівається повільно (2...5°C/год). При включенні ТЕНів відносна вологість середовища знижується з 90...100% до 5...8%, що приводить до інтенсивного сушіння виробів. Керамзитобетонні вироби при цьому втрачають 50...70 кг води на 1 м<sup>3</sup> бетону, на що витрачається третина усієї витрати електроенергії. Вироби після обробки за допомогою ТЕНів мають вологість 10...11% у порівнянні з 18...20% після пропарювання. Виготовлені в таких камерах огорожувальні конструкції мають значно меншу теплопровідність і сприяють значній економії теплової енергії в процесі експлуатації будівель.

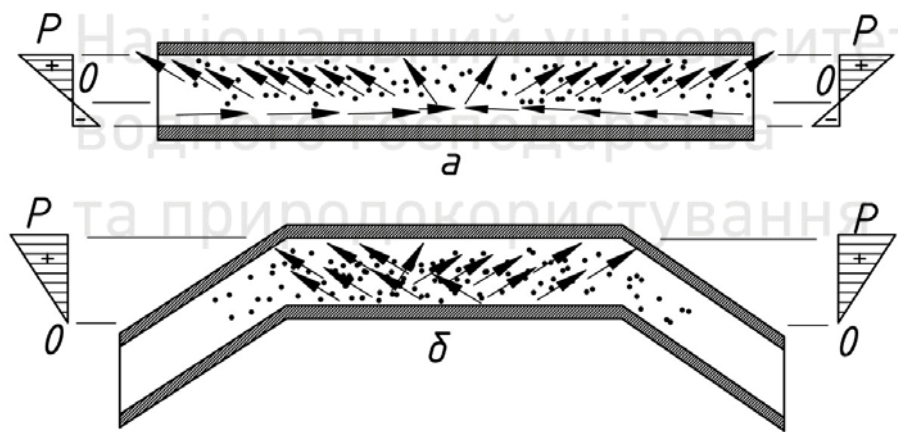
В щільних камерах для покращення умов теплообміну монтуються вентиляційні системи: рециркуляційна – в зоні нагріву і притічно-витяжна – в зоні охолодження. Повітряні завіси, що перекривають торці камери і відокремлюють зону охолодження від зони ізотермічного витримування, сприяють економії теплоти.



### Полігональні камери.

Незважаючи на різні заходи по підвищенню ефективності роботи, традиційні щілинні камери мають ряд теплотехнічних недоліків, що обмежують їх застосування. Основний полягає в тому, що через торці знизу в камеру проникає багато холодного повітря, а через верхню частину торців відбувається витік тепла (рис. 3.41, а). Цим пояснюється пересушування виробів і зниження ефективності прогріву при високих температурах. В щілинній камері важко підтримувати стаціонарний режим, що веде до подовження циклу термообробки і перевитрати теплоносія.

Вказаних недоліків позбавлені камери полігональної форми конструкції Є.В.Тихомирова, що є ефективною модифікацією щілинних камер. Тут є чітко виражені зони нагріву, ізотермічної витримки і охолодження (рис. 3.41, б). Зони підігріву й охолодження виконані похило, а зона ізотермічної витримки – горизонтально. В камері створюється можливість влаштування зони із середовищем чистої пари, а завдяки характерному профілю пара утримується в цій зоні; при цьому низ горизонтальної частини камери повинен бути вищим верха її торців не менше ніж на 0,7...1,0 м. Перевагою полігональних камер є також те, що відпадає потреба в складній системі циркуляції і додатковому зволоженні пароповітряної суміші для встановлення рівномірного температурно-вологісного режиму, а також у влаштуванні повітряних завіс для розмежування зон теплової обробки.



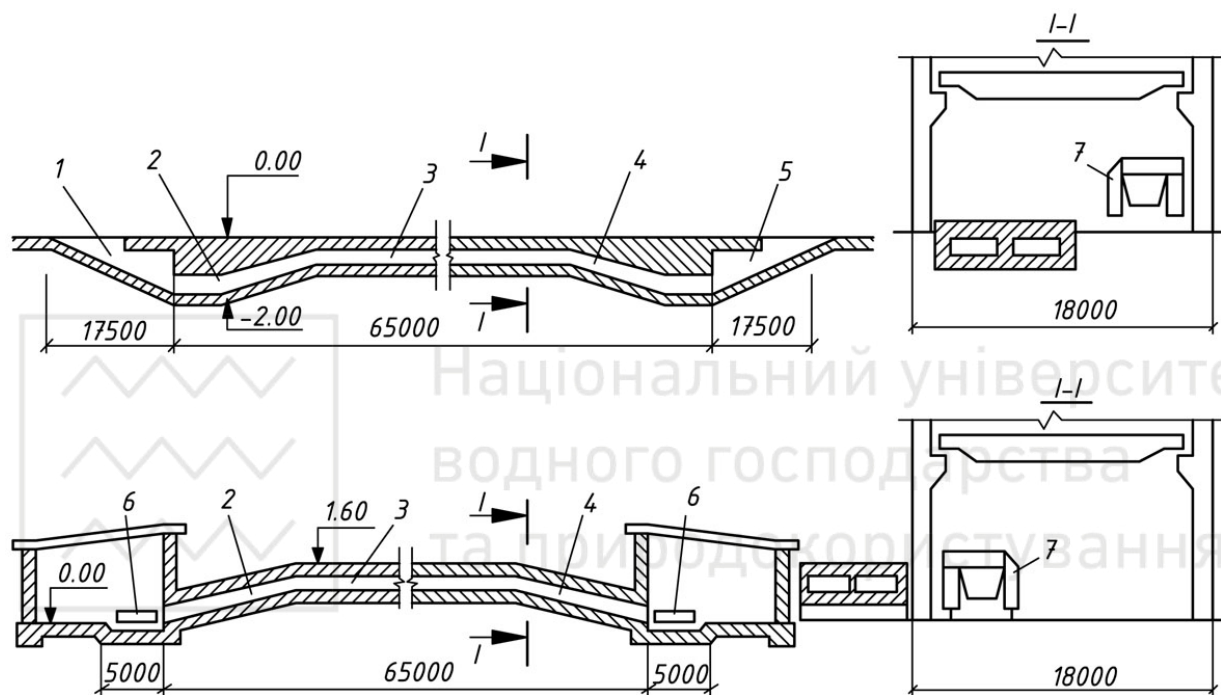
**Рис. 3.41.** Схема руху теплових потоків і розподілу тиску в щілинній камері (а) і в камері полігональної форми (б)

Завдяки профілю полігональних камер в них створюються оптимальні умови для теплової обробки бетону: температура ізотермічного прогріву може досягати 92...97°C при відносній вологості 95...97%. Витрата пари та тривалість теплової обробки може бути зменшена на 10...20% у порівнянні із щілинними камерами.

Завдяки профілю полігональних камер в них створюються оптимальні умови для теплової обробки бетону: температура ізотермічного прогріву може досягати 92...97°C при відносній вологості 95...97%. Витрата пари та тривалість теплової обробки може бути зменшена на 10...20% у порівнянні із щілинними камерами.



Полігональні камери, як і щілинні, можуть поєднуватися з лінією формування у єдиний вертикально- або горизонтально-замкнутий конвеєр. Виконуються вони підземними з завантажувальними і вивантажувальними напрямками (рис. 3.42), наземними, розташовуваними всередині цеху, і наземними, винесеними за межі цеху. Розміщення камер поза виробничим приміщенням дозволяє повніше і раціональніше використовувати площі, що звільнилися, поліпшити умови роботи в цеху.



**Рис. 3.42.** Полігональні камери:

а – підземна; б – виносна наземна

1– завантажувальний пристрій; 2 – зона підйому температури; 3 – зона ізотермічної витримки; 3 – зона охолодження; 5 – вивантажувальний пристрій; 6 – форми-візки; 7 – конвеєр формування

### Тунельні камери.

Якщо продуктивність одноярусної щілинної камери не забезпечує теплову обробку виробів, що випускаються формувальною установкою, то застосовують *багатоярусні тунельні камери*, які дозволяють значно заощаджувати виробничі площі. В залежності від ритму конвеєра, довжини виробів і режиму тепловологісної обробки камери будують 2...6-ярусними довжиною 70...127 м. Ширина камери залежить від розмірів виробів (2,5...5,0 м), а висота – від кількості ярусів (висота одного ярусу 0,65...0,85 м). Яруси розділені формами-вагонетками, що

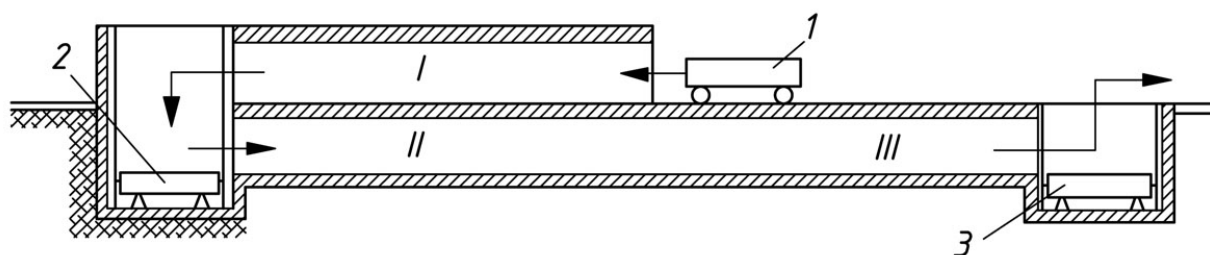


рухаються по горизонтальному рейковому шляху. Вироби на яруси подаються підйомниками і знімаються знижувачами.

Багатоярусні тунельні камери характеризуються нерівномірністю температури і відносної вологості по висоті, викликаною розшаруванням пароповітряної суміші. Різниця температур між ярусами складає 3...6°C, температура в зоні ізотермічного витримування триярусної камери в нижньому ярусі – від 60...65°C, у верхньому – до 75...80 °C. Відносна вологість середовища у верхніх ярусах на 25...30 % нижча, ніж у нижньому. Для забезпечення однакових умов тепловологісної обробки і рівної міцності виробів доцільний поділ ярусів перекриттями і створення індивідуальних систем теплопостачання для кожного ярусу.

Розроблені також тунельні *двохярусні камери*, які можна розглядати як щілинні камери із розташованими *на різних рівнях зонами теплової обробки*.

На рис. 3.43 показана *двохярусна камера*, де виріб на вагонетці *I* входить в зону нагріву *I*, нагрівається і попадає на знижувач *2*. Знижувач спускає виріб на рівень рейок зони ізотермічної витримки *II*, що відділена від зони нагріву глухим перекриттям. Після зони *II* виріб потрапляє в зону *III*, де охолоджується за рахунок підсмоктування холодного повітря, і далі через підйомник *3* транспортується на пост розпалублення. Тепловологісна обробка в такій камері може здійснюватися паром або ТЕНами. Двохярусна камера займає менше місця у порівнянні із щілинною або полігональною і легше компонуються з іншим обладнанням.



**Рис. 3.43.** Схема двухярусной пропаривальной камеры:

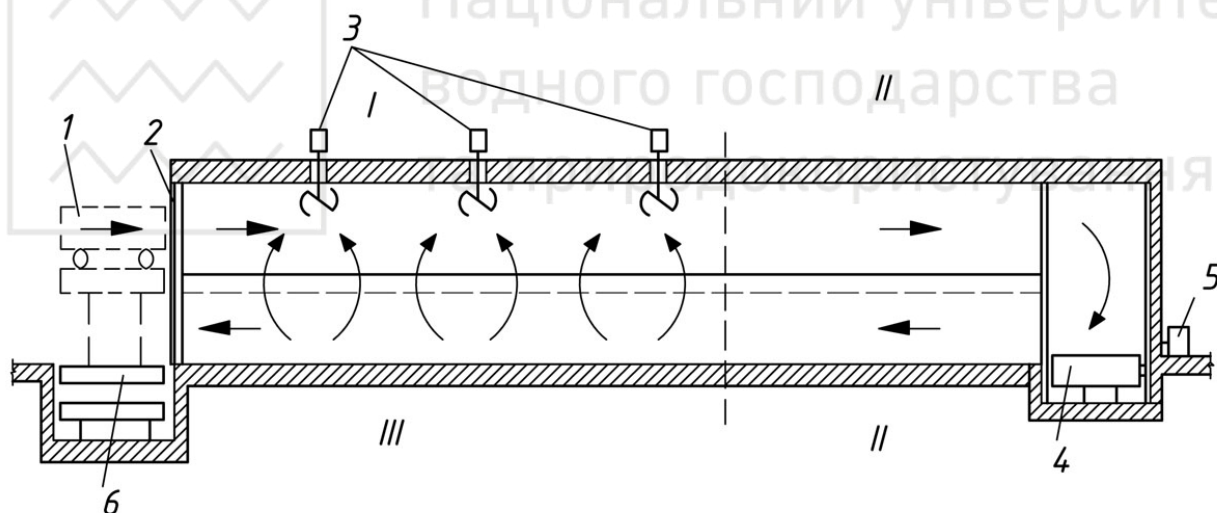
I, II, III – зоны нагріву, ізотермічної витримки і охолодження; 1 – вагонетка з виробом; 2 – знижувач; 3 – підйомник

Більш досконалою є конструкція двухярусной камери ВЕК-КІСІ конструкції А.А.Вознесенського (рис. 3.44). В даній камері зони теплової обробки розташовані також на різних рівнях, однак скомпонова-





ні по-іншому. Зона нагріву *I* займає верхній ярус, там же розташована половина зони ізотермічної витримки *II*. Форми-вагонетки після проходження верхнього ярусу знижувачем опускаються на нижній ярус, де продовжується зона ізотермічної витримки *II* і розташована зона охолодження *III*. Така схема руху виробів, а також деякі конструктивні особливості (зокрема відсутність суцільного перекриття між зонами *I* і *III*) дозволяють ощадливо витратити теплову енергію і значно знизити питомі витрати теплоти на теплову обробку. Двохярусна камера з входом і рухом холодних виробів у верхній зоні дозволяє раціонально використовувати розшарування пароповітряної суміші по висоті. При цьому для нагрівання форм і виробів – основної статті витрати в тепловому балансі – використовується теплота вихідних виробів, що рівна витраті теплоти на нагрівання і втрачається безповоротно в щільних і звичайних тунельних камерах. Така схема також дозволяє застосовувати теплоту екзотермічних реакцій, що виділилася в процесі тепловологісної обробки виробів, для нагрівання холодних виробів.



**Рис. 3.44.** Схема двухярусной камеры ВЕПК-КІСІ:

*I*, *II*, *III* – зони нагріву, ізотермічної витримки і охолодження; 1 – вагонетка з виробом; 2 – штора; 3 – циркуляційний вентилятор; 4 – знижувач; 5 – штовхач; 6 – підйомник

Інтенсивному теплообміну між нагрітими і холодними виробами сприяє установка циркуляційних вентиляторів 3. Камера є тупиковою, має один торець, закритий шторою 2 або повітряною завісою, що також знижує витрати теплоти в порівнянні з камерами, які мають два відкритих торці.

Теплоносієм є пара, що подається в глуху торцеву частину, в зону ізотермічної витримки, де температура досягає 100°C, а відносна во-





логість 100%. Надлишок пари, піднімаючись нагору, рухається до відкритого торця і, зустрічаючи на шляху вхідні холодні вироби, конденсується з виділенням теплоти пароутворення. Конденсат, рухаючись по ухилу з зони ізотермічної витримки через зону нагрівання-охладження, також віддає свою теплоту виробам, що нагріваються.

Ефективна теплова ізоляція огорожень, зменшення вибивання пароповітряної суміші, використання теплоти нагрітих виробів і екзотермічних реакцій в'язучого дозволяє значно підвищити ККД установки і забезпечити мінімальні питомі витрати теплової енергії.

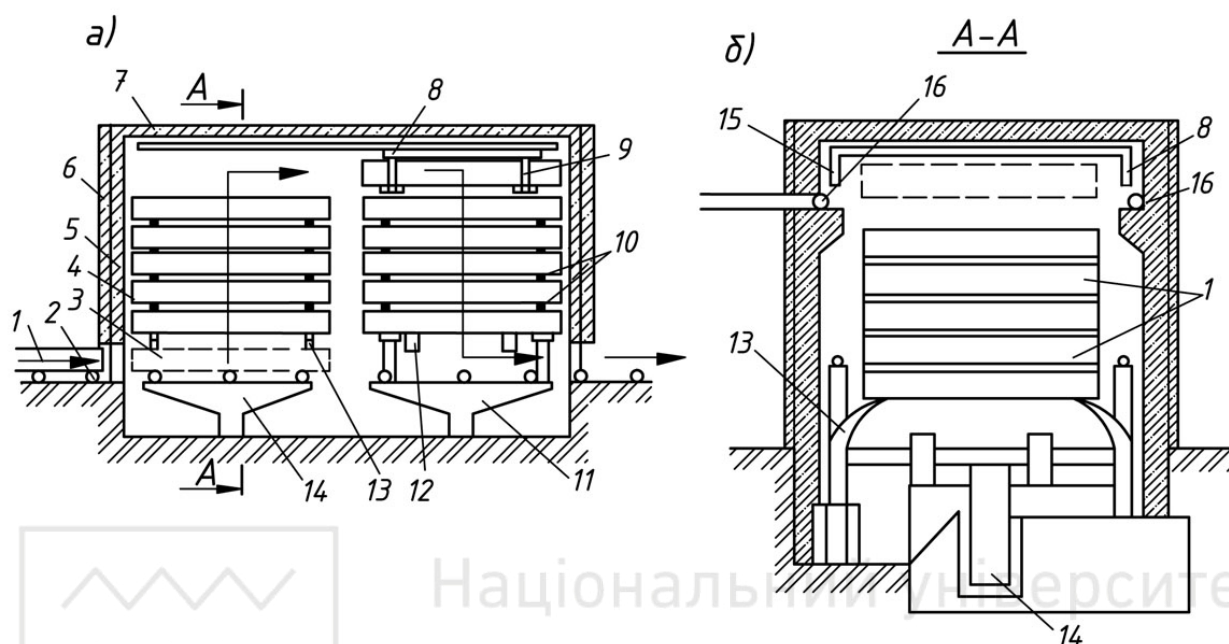
### **3.13.2. Вертикальні пропарювальні камери**

З метою зменшення площ, що займають горизонтальні камери неперервної дії а також для раціонального використання природного розшарування пароповітряної суміші розроблені вертикальні камери паропрогріву. Одна із модифікацій таких камер показана на рис. 3.45. Вони можуть бути обладнані гідропідйомником і знижувачем при висоті камери 9 м (2-штабельна схема) або двома підйомниками і двома знижувачами при висоті камери 5,5...6 м (4-штабельна схема).

Робота вертикальної камери полягає в наступному. Виріб 1 рухається у формі-вагонетці по привідному роликівому конвеєрі 2, потім за допомогою кінцевих вимикачів зупиняється на позиції 3 (позначено пунктиром) в камері 4, що складається з бетонної коробки 5, покритої шаром теплоізоляції 6. Коробка закрита бетонною герметичною кришкою 7. Кінцеві вимикачі включають в роботу завантажувальні гідродомкрати 14, що піднімають форму з виробом, втоплюючи фіксатори 13. Піднімаючи форму трохи вище фіксаторів, гідродомкрати піднімають і весь штабель виробів, що знаходиться на завантажувальній стороні. При цьому фіксатори повертаються в робоче положення, а гідродомкрати починають рухатися вниз, опускаючи весь штабель на фіксатори, де нижнім виявиться завантажений виріб. Гідродомкрати займають нижнє положення і виключаються.

При вимиканні гідродомкратів включається передавальний візок 8, що забирає верхню форму з виробом своїми захватами 9 і ставить на верх іншого штабеля на розвантажувальній стороні. Вивантаживши форму з виробом, передавальний візок повертається у вихідне положення і виключається. Одночасно включаються гідродомкрати 11 на

розвантажувальній стороні, вони займають верхнє положення і піднімають розвантажувальний штабель над привідними фіксаторами 12. Фіксатори звільняються і гідроприводом прибираються в пази.



**Рис. 3.45.** Схема вертикальної пропарювальної камери:

а – повздовжній розріз; б – поперечний розріз

Гідродомкрати починають опускатися рівно на висоту однієї форми-вагонетки і зупиняються. В цей час фіксатори приводом виштовхуються в робочий стан і попадають в пази 10 другої від низу форми, утримуючи на собі штабель. Гідродомкрати з нижнім виробом, що звільнився, роблять свій другий хід і опускають виріб на привідний роликівий конвеєр вивантаження, що включається, як тільки гідродомкрати займуть крайнє нижнє положення, і виріб виходить з камери.

Система паропостачання вертикальної камери складається з вузлів регулювання тиску і витрати і системи роздачі пари, що включає кільцевий перфорований колектор 16, змонтований у верхній частині камери 15.

Виходячи з паропроводу, пара піднімається у верхню частину камери, витісняючи повітря. У верхній зоні камери постійно підтримується середовище чистої насиченої пари з відносною вологістю 100% і температурою 100°C; нижче знаходиться пароповітряна суміш з температурою, що поступово знижується (на рівні вхідного отвору температура приблизно рівна температурі навколишнього середовища).



Таким чином, вироби, піднімаючись нагору, послідовно попадають в зони з більш високою температурою, у верхній частині камери проходять ізотермічне витримання, а потім, знижуючись, проходять зони з більш низькою температурою і охолоджуються. Зміною витрати пари регулюють висоту меж зон нагрівання – охолодження та ізотермічного витримання, тим самим регулюючи тривалість перебування виробів в кожній зоні.

Основна із *переваг вертикальних камер* – їх стійкий тепловий режим, що забезпечує ефективний теплообмін, спрощує експлуатацію, дозволяє точно планувати терміни теплової обробки і забезпечує можливість організації конвеєрної технологічної лінії. Ці камери займають в 2...3 рази меншу площу, ніж ямні, і в 10...12 разів меншу, ніж щілинні або тунельні камери тієї ж продуктивності.

До *недоліків вертикальних камер* слід віднести високу металоємність, можливість виходу з ладу механізмів, що знаходяться в середовищі чистої насиченої пари, і низький коефіцієнт використання об'єму камери.

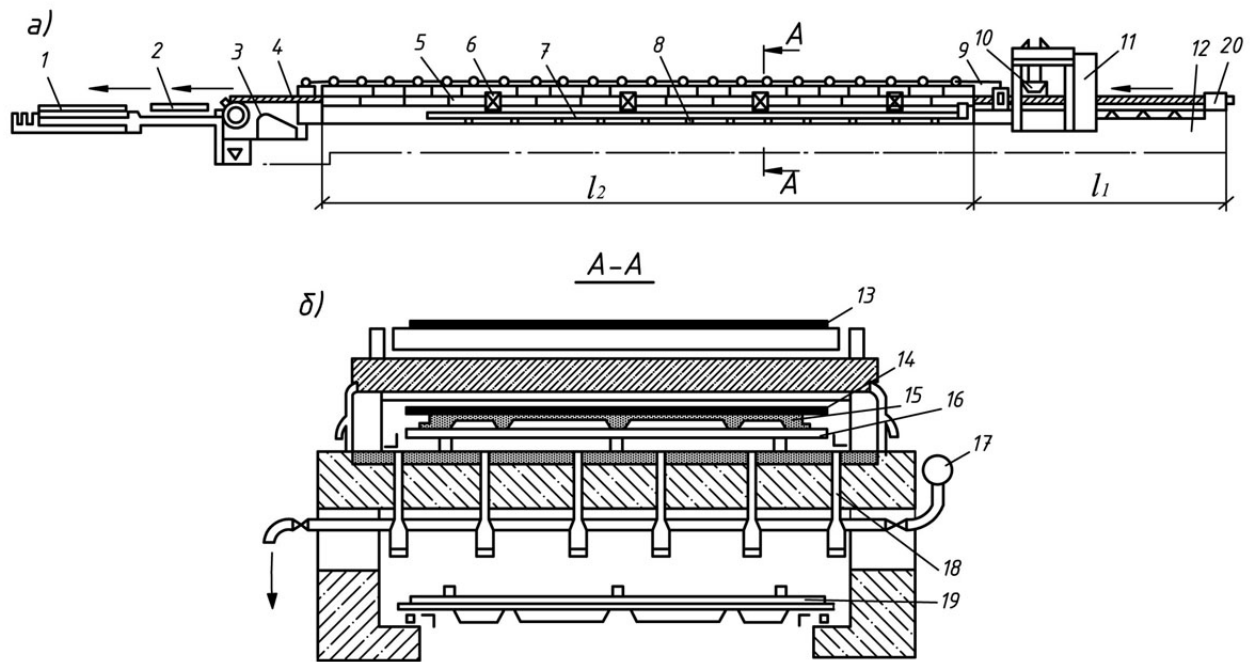
Шляхом раціонально створеного в таких камерах режиму роботи і подачі пари значною мірою підвищується коефіцієнт корисного використання теплоносія, а питома витрата пари знижується до 100...150 кг/м<sup>3</sup> бетону.

### **3.13.3. Вібпрокатні стани**

Вібпрокатні стани являють собою високомеханізовані установки неперервної дії, на яких виконуються всі технологічні операції по виготовленню виробів зі збірного залізобетону, в тому числі їх тепловологісна обробка.

Схема вібпрокатного стану показана на рис. 3.46. Стан умовно поділяється на дві частини: формувальну разом з підготовчими операціями  $l_1$  і щілинну пропарювальну камеру  $l_2$ ; довжина цієї камери 50...60 м.

Пара надходить по паропроводу  $17$  і через трубопровід  $7$  розподіляється в патрубки  $18$ , що подають її в камеру і під верхню гілку формувальної стрічки; в результаті забезпечується двосторонній прогрів виробів. Для запобігання спучування і деформації виробів їх зверху накривають гумовою стрічкою  $4$ . подача пари регулюється, тому швидкість нагрівання можна змінювати (тривалість нагріву до 90...95°C складає 1,5...2 год).



**Рис. 3.46.** Схема вібропрокатного стану:

а – поздовжній розріз; б – поперечний розріз; 1 – перекидач; 2 – обгінний ролик-конвеєр; 3 – привідна станція; 4, 16 – формувальна стрічка; 5 – щілинна камера; 6 – люки; 7 – паропровід; 8 – відвідний паропровід; 9 – натяжна станція накривної стрічки; 10 – бункер бетоноукладача; 11 – бетонозмішувач; 12 – фундамент; 13 і 14 – верхня і нижня гілки накривної стрічки; 15 – виріб; 17 – магістральний паропровід; 18 – патрубки; 19 – нижня гілка формувальної стрічки; 20 – натяжна станція формувальної стрічки

Виріб із щілинної пропарювальної камери надходить на обгінний ролик-конвеєр 2 і далі на перекидач 1. Потім у вертикальному положенні його встановлюють на складі готової продукції. Питома витрата пари для щілинних пропарювальних камер вібропрокатного стану складає  $300 \dots 350 \text{ кг/м}^3$  бетону. Загальна тривалість тепловолісної обробки –  $3 \dots 5$  год.

До переваг вібропрокатних установок варто віднести компактність, поєднання в одній установці всіх технологічних операцій, високий рівень механізації і автоматизації. Однак складність механічної частини стану, забруднення направляючих і велика кількість з'єднань, шарнірів приводять до частих поломок; при заміні типу виробів потрібна заміна всієї формувальної стрічки, вартість якої складає третину вартості стану; застосування дрібнозернистих бетонів і скорочених режимів обробки вимагає підвищених витрат високомарочних цементів. Всі ці недоліки стримують широке поширення вібропрокатної технології.



### 3.14. ЕЛЕКТРОТЕПЛОВА ОБРОБКА БЕТОНУ

Електротеплову обробку бетону застосовують з метою прискорення його твердіння за рахунок використання теплоти, що отримується від перетворення електричної енергії в теплову.

Застосування методів електротеплової обробки бетону при виготовленні виробів у заводських умовах і на полігонах скорочує час витримання їх у формах і знижує вартість прогрівання, значно підвищує культуру виробництва і поліпшує санітарно-гігієнічні умови праці, дає можливість автоматизувати виробничі процеси. В той же час, доцільність використання електроенергії для теплової обробки (особливо у порівнянні із паропрогрівом) повинна обґрунтовуватись техніко-економічними розрахунками.

Методи електротеплової обробки класифікують на три наступні групи: електродне прогрівання (власне електропрогрівання); обігрівання різними електронагрівальними пристроями; нагрівання в електромагнітному полі (індукційне прогрівання).

*Електродне прогрівання бетону* здійснюють безпосередньо в конструкції або до його укладання в опалубку (попереднє електророзігрівання), пропускаючи електричний струм через бетон або бетонну суміш. При використанні цього методу температуру матеріалу можна підвищити до необхідного рівня за будь-який проміжок часу – від декількох хвилин до декількох годин.

*Електрообігрівання за допомогою електронагрівальних пристроїв* здійснюється шляхом подачі теплоти до поверхні бетону від джерел перетворення електричної енергії в теплову – нагрівачів інфрачервоного випромінювання або низькотемпературних нагрівачів (сітчастих, коаксіальних, плоских, ТЕНів і ін.). У внутрішні шари конструкції теплота передається шляхом теплопровідності.

*Прогрівання бетону в електромагнітному полі* здійснюється передачею теплоти від сталених елементів опалубки, арматури і закладних деталей, що розігріваються вихровими струмами. Електромагнітне поле з параметрами, що застосовуються на практиці, безпосереднього впливу на бетон не здійснює, а у внутрішні шари матеріалу теплота передається шляхом теплопровідності.





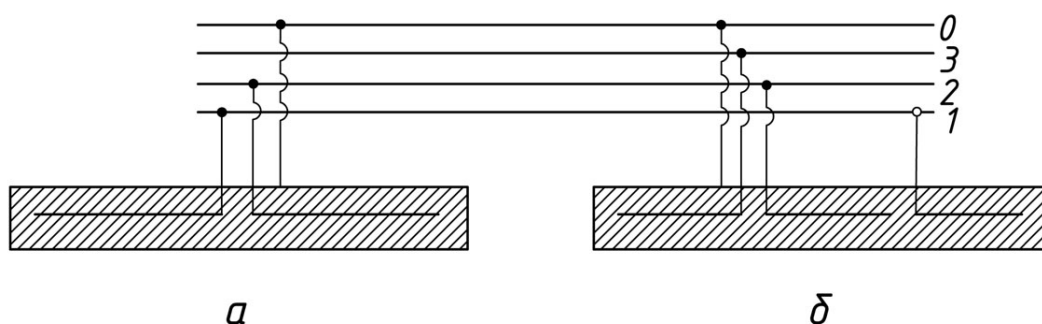
### 3.14.1. Електропрогрівання

**Електропрогріванням** називається спосіб теплової обробки виробів електричним струмом, що пропускається безпосередньо через бетон. В цьому випадку бетон виробу включається в електричне коло як опір і всередині нього електрична енергія перетворюється в теплову. Використовується енергія змінного струму промислової частоти. Постійний струм не застосовують, оскільки він викликає електроліз води.

Щойно відформовані вироби підключають в електричне коло електродами з арматурної і сортової сталі. Електроди, закладені всередину бетону, що прогривається, називаються внутрішніми, а розташовані на поверхні – зовнішніми.

Внутрішні електроди поділяються на стержневі і струнні.

*Стержневі електроди* виготовляють короткими з відходів арматурної сталі діаметром 6...10 мм. Застосовують їх для електропрогрівання балок, колон, фундаментних блоків, плит товщиною понад 15 см та інших виробів, встановлюючи перпендикулярно до повздовжньої осі виробів і випускаючи кінці з бетону на 10...15 мм для приєднання до кола. Стержневі електроди зменшують ймовірність короткого замикання. Однак для масового виробництва залізобетонних конструкцій їх не рекомендують через додаткову витрату металу, одноразове використання електродів, значні витрати на їх установку і труднощі точного розрахунку електричного і теплового поля у виробі.



**Рис. 3.47.** Схема електропрогрівання виробів струнними електродами:

а – двома струнами; б – трьома струнами

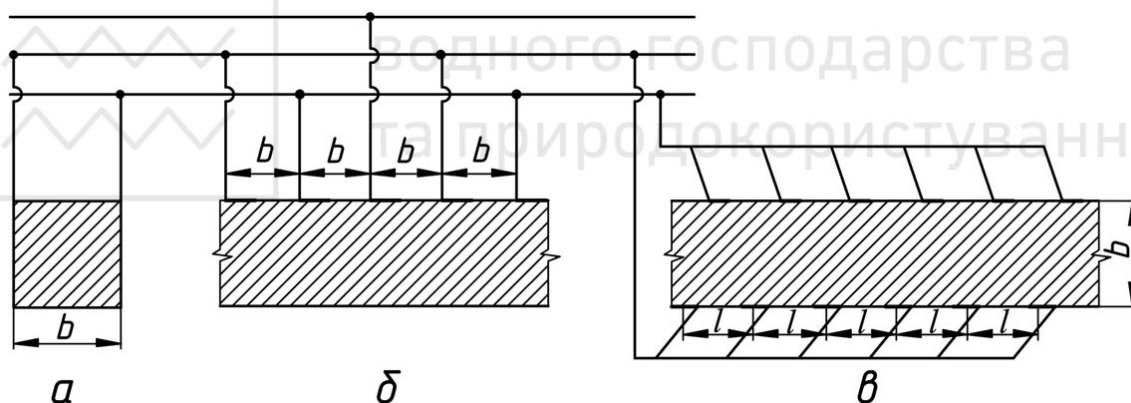
*Струнними електродами*, що закладаються всередину арматурного каркаса, але ізольованими від нього (рис. 3.47) прогривають довгомірні конструкції (балки, колони і т.п.). Струни виготовляють із дроту діаметром 3...4 або круглої арматурної сталі діаметром 6...10 мм. Кінці струн виводять назовні для підключення до мережі.



Внутрішні електроди (стержневі і струнні) не повинні стикатися з арматурою з метою уникнення замикання кола або місцевого перегріву бетону. Прошарок бетону між арматурою і електродом повинен бути не меншим 5...10 см (в залежності від прийнятої напруги струму).

Зовнішні електроди – пластинчаті, смугові і суцільні – застосовують для периферійного прогрівання масивних конструкцій.

*Пластинчаті і смугові* електроди (рис. 3.48) зі сталі товщиною до 2 мм закріплюють на внутрішній стороні бортів форм через 10...20 см один від іншого. Кінці електродів відгинають і виводять назовні для підключення до електричного кола. Форми виготовляють із струмонепровідних матеріалів (дерево, пластмаса тощо). Смугові електроди розміщують вздовж одного борта для електропрогрівання конструкцій товщиною до 15...20 см. При цьому сусідні смуги підключають до різних фаз мережі. Більш масивні конструкції прогривають у формах, на яких електроди встановлені вздовж обох повздовжніх бортів.



**Рис. 3.48.** Схема прогрівання бетону зовнішніми електродами:

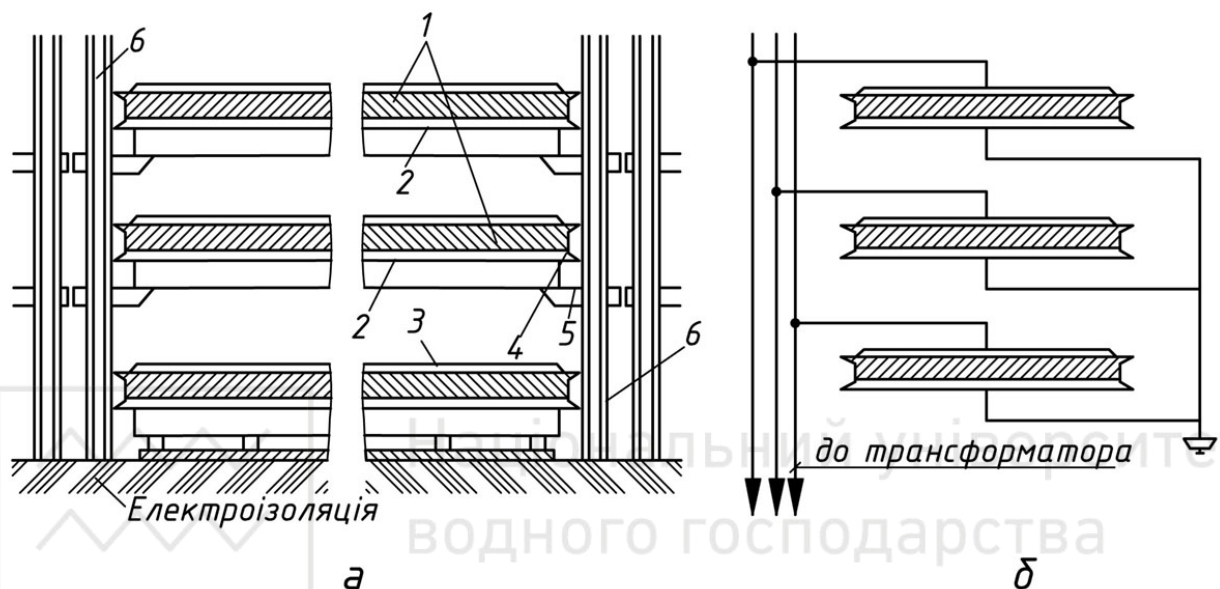
а – пластинчатими; б – смуговими одностороннього розміщення;  
в – смуговими двостороннього розміщення

*Суцільний електрод* являє собою твердий каркас зі швелерів, обшитий з обох сторін листовою сталлю і який закриває всю верхню частину виробу. Він рівномірно прогриває виріб по всій площині і запобігає випаруванню вологи. Виконуючи роль одночасно привантаження і термощита, такий електрод зменшує температурні деформації бетону і значно знижує тепловтрати. Але, при укладанні його на поверхню бетону, що затужавів, важко досягти надійного контакту по всій площині внаслідок неминучих нерівностей як поверхні бетону, так і елект-



рода. Тому укладають його з частковою вібрацією до кінця тужавлення бетону. Суцільний електрод повинен бути твердим, щоб не порушувався його контакт із поверхнею виробу в процесі прогрівання.

При виготовленні виробів у горизонтальних формах (рис. 3.49) одним електродом служить піддон, а в пакетних формах – проміжні перегородки і зовнішні поперечні стінки.



**Рис. 3.49.** Схема електропрогрівання виробів в горизонтальних формах:

а – поперечний розріз; б – схема підведення струму до виробів;

1 – залізобетонні вироби; 2 – форми; 3 – верхні електродні щити; 4 – електроізолюване бортоснащення форми; 5 – поворотно-опускні консолі; 6 – стійки

Використовувати в якості електродів арматуру конструкцій, що прогріваються, не рекомендується для уникнення можливого пересушування шару бетону поблизу арматури і зменшення зчеплення між ними. В невідповідальних конструкціях можна застосовувати струмоведучі арматурні сітки.

Панелі перегородок, плити перекриттів та інші плоскі вироби прогрівають у касетних установках, де в якості електродів використовують розділювальні стінки і зовнішні щити. Для виробництва подібних виробів ефективною є касетно-конвеєрна технологія з тепловими відсіками, оснащеними смуговими нагрівачами, що виготовлені з хромо-нікелевої стрічки  $3 \times 20$  мм довжиною 90...100 м і розташовані паралельно касетним стінкам із кроком 250...300 мм на порцелянових електроізоляторах, утворюючи по всій площі відсіку плоску зигзагоподібну спіраль. При підведеній напрузі 380 В і розрахунковому струмі 220 А встановлена потужність складає 60...80

встановлена потужність складає 60...80 кВт на відсік або 3 кВт на 1 м<sup>2</sup> нагрівальної поверхні.

Під час електропрогрівання у виробі виникають температурні і вологісні градієнти, постійно спрямовані від середини до периферії. Волога мігрує до поверхні і випаровується. Інтенсивність випаровування залежить від температури і тривалості прогрівання, розташування електродів і утеплення бетону. Щоб запобігти пересушування твердіючого бетону, відкриті поверхні вкривають паро- і теплоізоляційними матеріалами (плівками, матами, щитами тощо). Укриття не обов'язкове при електропрогріванні легких і ніздрюватих бетонів, що повинні мати знижену відпускну вологість.

Загальні витрати електроенергії при тепловологісній обробці бетону способом електропрогрівання складають 50...150 кВт·год/м<sup>3</sup>. Менші величини характерні для літнього періоду часу, хорошій теплоізоляції і високоекзотермічних цементів.

### 3.14.2. Електрообігрівання бетону випромінюванням

При тепловологісній обробці бетону інфрачервоним випромінюванням тепловий потік від електронагрівників може безпосередньо сприймати відкрита поверхня виробу, обумовлюючи швидкий її нагрів або нагрівати стінки форми від яких теплота кондуктивно передається поверхні виробів і поширюється всередину.

Інфрачервоні промені являють собою невидимі теплові промені, випромінювані нагрітою поверхнею твердого тіла. Довжина хвиль інфрачервоного випромінювання (0,76...500 мкм) залежить від температури випромінюючої поверхні генератора. При заводському виготовленні залізобетонних виробів використовують інфрачервоні промені, довжина хвиль яких не більша 6 мкм, що відповідає температурі поверхні генератора до

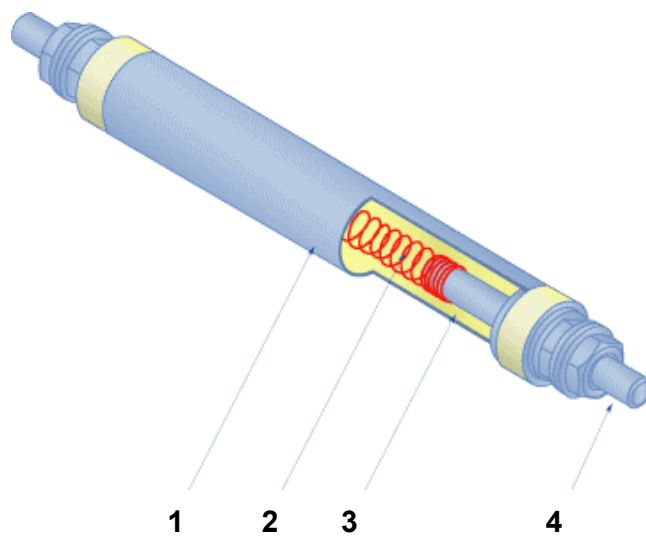


Рис. 3.50. Схема трубчастого електронагрівача:

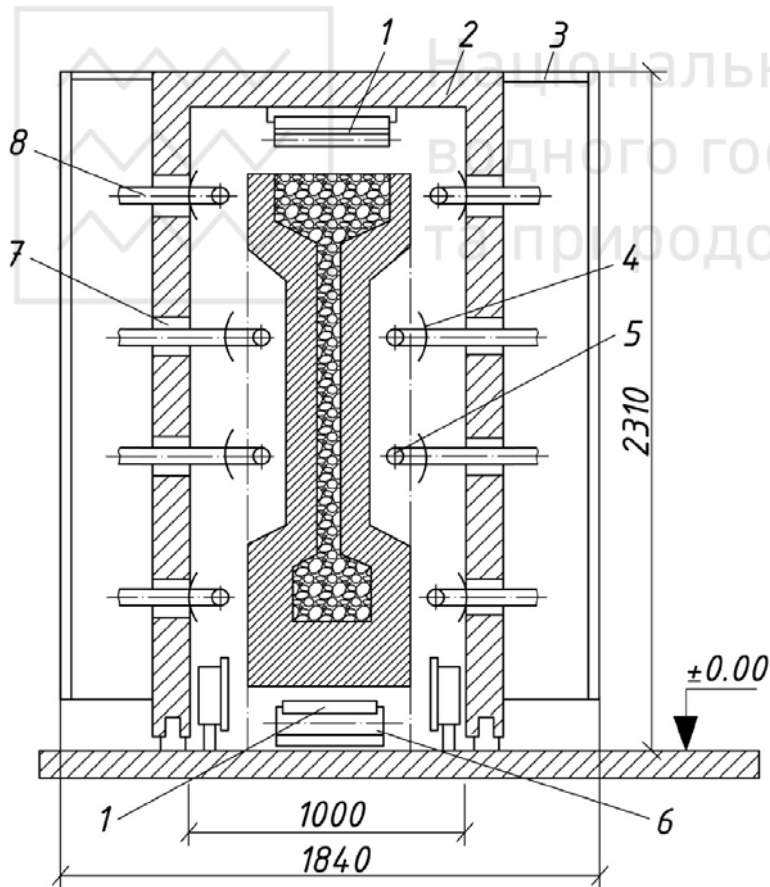
1 – оболонка; 2 – спіраль; 3 – наповнювач (ізолятор); 4 – контактна частина



2400°C. В якості джерела інфрачервоного випромінювання найчастіше використовують різні випромінювачі: трубчасті електронагрівачі, стержневі карборундові, керамічні електричні лампи та інші.

*Трубчасті електричні нагрівачі (ТЕНи)* (рис. 3.50) – це тонкостінні металеві трубки діаметром 6...18 мм і довжиною від 200 до 3000 мм, в центрі яких поміщена ніхромова або фехралева спіраль опору. Трубки виконують з нержавіючої сталі або латуні. Ізоляторами, що заповнюють трубку, служать пісок, окис магнію або амонію. Потужність ТЕНів – 100...4000 Вт при напрузі 220 В. Залежно від потужності температура на поверхні ТЕНів змінюється від 400 до 800°C. Вони прості в експлуатації, стійкі проти механічних і термічних впливів, мають різну форму і термін служби від 5000 до 10000 год.

*Карборундові випромінювачі* являють собою стержень з карбїду кремнію діаметром 6...50 мм і довжиною 0,3...1,0 м; робоча температура 1300...1500°C.



**Рис. 3.51.** Пересувна камера для електрообігрівання випромінюванням:

- 1, 5 – осьові та бокові випромінювачі; 2 – огорожена камера; 3 – огороження струмопровідної частини; 4 – алюмінієвий відбивач; 6 – опора випромінювача; 7 – електроізолятор; 8 – струмопровідна рамка

*Інфрачервона установка* складається з інфрачервоних випромінювачів у комплекті з відбивачами і підтримуючими пристроями. Конструктивно установки являють собою сферичні або трапецієподібні відбивачі, у внутрішній площині яких розміщені випромінювачі з підтримуючими пристроями. Сферичні відбивачі застосовують для передачі енергії випромінюванням на відстань до 3 м, а трапецієподібні – до 1 м.

В залежності від конструктивних особливостей термооброблюваних виробів існує ряд модифікацій установок:





"короб" (термообробка плит перекриттів і покриттів, дорожніх плит, відігрівання промороженого бетону і ґрунту); *двоступінчата плоска опалубка* (при термообробці лінійних елементів); *камера щільного типу з генераторами інфрачервоних променів* (для виробів, що виготовляються за конвеєрною технологією – див. п.3.13.1); *камера з випромінюючими поверхнями*; "ковпак" (термообробка об'ємних елементів) (рис. 3.51); *стержні, що вводяться в канали елементів* (при обробці багатопустотних плит); *установки стовпчастого типу* (термообробка трубчастих елементів).

При тепловій обробці інфрачервоними променями міцність бетону багато в чому залежить від умов опромінення (режиму обігрівання, розташування випромінювачів), а інтенсивність теплового потоку на поверхні матеріалу – від відстані до джерела випромінювання (в зворотній пропорції).

Ефективність інфрачервоного обігрівання є високою для виробів невеликої товщини – до 15...20 см. Для виробів товщиною понад 20 см рекомендують двостороннє обігрівання. Оскільки швидке прогрівання бетону приводить до інтенсивного випарування з нього вологи, відкриті поверхні виробів варто закривати вологонепроникними, але максимально променепрозорими матеріалами. Для цього використовують, наприклад, поліамідну плівку, що володіє незначним променепоглинанням. Для легких бетонів такі заходи недоцільні.

При інфрачервоному обігріванні можна сполучати тепловологісну обробку і підсушування виробів, що ефективно використовується при виготовленні конструктивно-теплоізоляційних матеріалів. Для прикладу, питома витрата електроенергії на теплову обробку керамзитобетонних виробів складає 80...100 кВт·год/м<sup>3</sup>, при цьому витрата теплоти на нагрівання бетону складає всього 21%, а значна частина теплоти витрачається на випаровування вологи (32 %).

### **3.14.3. Прогрівання бетону в електромагнітному полі**

Спосіб прогрівання бетону індукційними струмами ґрунтується на явищі електромагнітної індукції.

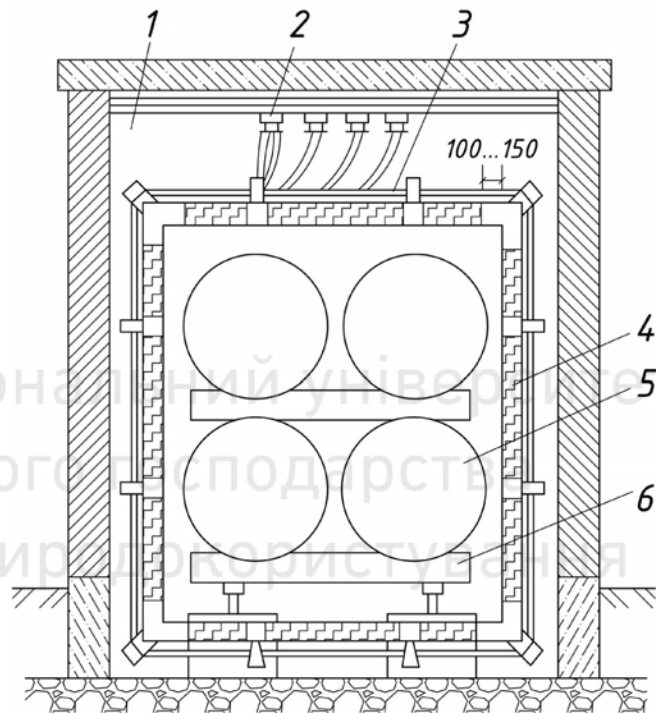
*Індукційне прогрівання* – один з найбільш ефективних методів нагрівання бетону. Зміст його полягає в наступному: бетонний виріб (армований або неармований) в металевій формі поміщають в індуктор. В даному випадку індуктором є камера, по якій проходить елект-



ричний струм. В металевій формі під дією магнітного поля наводиться ЕРС індукції, що викликає виникнення вихрових струмів, які поширюються по перерізу стінок форми і нагрівають їх. Найбільша температура розвивається на поверхні форми. З'являється найбільш нагрітий поверхневий шар, від якого шляхом теплопровідності теплота передається внутрішнім шарам форми і далі матеріалу.

На рис. 3.52 представлена індукційна камера для тепловологісної обробки залізобетонних труб.

В камеру 1 на вагонетці 6 завантажуються вироби у формі 5. Камера обладнана опорними ізоляторами 2, на яких кріпляться струмопровідні шини, що живлять індуктор. Вагонетка з формами, що містять залізобетонні труби, попадає всередину електромагнітної обмотки індуктора 3, що складається із секцій 4. За рахунок проходження струму промислової частоти напругою 380/220В в індукторі наводиться змінне електромагнітне поле. Магнітний потік індукує в сталевій формі ЕРС, що викликає вихрові струми, від яких металева форма розігрівається до 200...230°C протягом 2,5...3 год. Теплообмін між розігрітими стінками і матеріалом здійснюється кондуктивно.



**Рис. 3.52.** Схема тепловологісної обробки залізобетонних труб індукційним способом

Теплотехнічний принцип роботи такої камери близький до принципу роботи касетних установок.

З точки зору теплотехніки індукційний метод можна застосовувати і для індивідуального нагрівання закритих форм. В цьому випадку в поверхнях форм робляться пази, куди вкладають обмотку індуктора з рознімними контактами для зняття кришки. При індивідуальному нагріванні індукційним методом процес гідратації і виникнення новоутворень може проходити швидше і з більшим ефектом.

Необхідна активна потужність на термообробку 1 м<sup>3</sup> бетону в залежності від режиму прогрівання складає 2...10 кВт. Повна ж потуж-



ність залежить від коефіцієнта потужності електричного кола, який в свою чергу обумовлений ступенем насиченості перерізу конструкції металом, периметром індуктора і електроопором поверхні арматури. Тому при індукційному прогріванні повна потужність при рівних інших умовах буде вища, ніж при електропрогріванні і складе 5...20 кВт на 1 м<sup>3</sup> бетону.

## 3.15. ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ

### 3.15.1. Загальні принципи

Розрахунок установок тепловологісної обробки виробів включає в себе наступні частини (етапи): конструктивний, технологічний, тепло-технічний, аеродинамічний і гідравлічний.

*Конструктивний розрахунок* дозволяє визначити внутрішні і зовнішні габарити установки, поверхні охолодження, робочий об'єм установки та об'єм, що займають форми і вироби, коефіцієнт заповнення установки.

*Технологічний розрахунок* полягає у виборі режиму тепловологісної обробки виробів, перевірці правильності обраного режиму шляхом виконання розрахунку прогрівання виробу; визначенні загальної тривалості циклу обробки, з врахуванням часу завантаження і вивантаження виробів; визначенні оборотності і річної продуктивності установки, а також кількості установок, необхідної для виконання заданої програми.

*Теплотехнічний розрахунок* установки виконують шляхом складання матеріального і теплового балансів. Матеріальний баланс дозволяє врахувати маси всіх матеріалів, що беруть участь в процесі тепловологісної обробки (сировинних матеріалів, закладних деталей, форм і транспорту, огорожувальних конструкцій), а тепловий – всі кількості теплоти, що надходять в установку і виходять з неї, а також визначити необхідну кількість теплоти в кожен період і в кожній зоні тепловологісної обробки, годинні і питомі витрати теплоносія або палива.

*Аеродинамічний розрахунок* установки виконують при наявності в установці дуттьових, циркуляційних або витяжних систем, повітряних завіс або систем повітряного охолодження. При цьому визначають кількість повітря, що бере участь в процесі, або теплоносія, розміри



газових трактів і їх опори; за продуктивністю і потужністю вибирають вентилятор або димосос.

*Гідравлічний розрахунок* складається з метою визначення діаметрів підвідних паропроводів і необхідного тиску пари, що надходить у систему. Такий же розрахунок робиться і для конденсатовідвідних систем.

*Більш детально зазначені етапи розрахунку для окремих видів установок розглянуті в п. 7.3. Нижче розкриті лише загальні питання відносно установок періодичної і неперервної дії а також, окремо, розрахунки установок електротеплової обробки та автоклавів.*

### **3.15.2. Розрахунок установок періодичної дії**

В конструктивному і технологічному розрахунках установок періодичної дії визначають габарити камери, сумарний об'єм і ступінь заповнення установки бетоном, річну продуктивність однієї установки, а також кількість установок, необхідних для виконання річної програми випуску виробів.

Розрахунок починають з уточнення номенклатури виробів, що випускаються, вибору базових і спеціалізації їх по різним камерам тепловологісної обробки. Для кожного виробу виписують наступні дані: розміри (довжину, ширину, висоту, діаметр технологічних порожнин); об'єм бетону і його склад, наявність арматури. За складом бетону і його густиною визначають теплофізичні характеристики: теплопровідність, теплоємність, температуропровідність. Розраховують розміри піддонів (або форм), їх об'єм і масу.

Габарити камери залежать від розмірів форм і кількості укладених в неї виробів. Камери можуть бути запроектовані в плані на кілька виробів, однак перевага надається однорядним, оскільки скорочуються простої під завантаженням і вивантаженням, а також збільшується оборотність установок.

Для визначення габаритів камери викреслюють ескіз укладання виробів. Довжина камери,  $m$ , дорівнює сумі розмірів форм і відстані між стінкою і формою, достатньої для проходу захватів автоматичної траверси ( $l_1 = 0,2...0,3$  м):

$$L_k = L_\phi + 2 \cdot l_1. \quad (3.32)$$



Ширина камери, м, залежить від кількості рядів форм  $n_1$ , ширини форм  $l_1$  і проміжків між ними; при укладанні виробів на інвентарні стійки з кронштейнами розмір стійок входить у проміжок  $l_1$ :

$$B_k = b_\phi \cdot n_1 + (n_1 + 1) \cdot l_1. \quad (3.33)$$

Висоту камери, м, визначають по формулі

$$H_k = h_1 + (h_\phi + h_2) \cdot n_2 - h_2 + h_3, \quad (3.34)$$

де  $h_\phi$  – висота форми (або виробу) на піддоні, м;  $h_1 = h_3 = 0,15 \dots 0,5$  – відстані від підлоги камери до днища форми і від поверхні верхнього виробу до кришки камери, м;  $h_2 = 0,05 \dots 0,075$  – відстань між виробами, що визначається установкою кронштейнів або спеціальних прокладок, м;  $n_2$  – кількість виробів, укладених по висоті, шт.

Висота камери обмежена можливим розшаруванням пароповітряної суміші і перепадом температур: для установок з паророподачею через перфоровані трубопроводи – до 3 м, а з інтенсивною циркуляцією гріючого середовища – до 4 м.

Зовнішні габарити установки розраховують, з огляду на товщину огорожувальних конструкцій; для зменшення тепловтрат камери розташовують блоками.

Кількість виробів, укладених в установці  $n = n_1 \cdot n_2$ ; об'єм бетону у виробках,  $m^3$ ,  $V_b = V_{бi} \cdot n$ .

Робочий об'єм установки,  $m^3$ :

$$V_k = L_k B_k H_k. \quad (3.35)$$

Сумарний об'єм форм з виробами,  $m^3$ ,  $V_\phi = V_{\phi i} n$ ; ступінь заповнення установки

$$g_\phi = V_\phi / V_k. \quad (3.36)$$

Тривалість технологічного циклу роботи тепловологісної установки, год,

$$\tau_{ц} = \tau_3 + \tau_{п.в.} + \tau_{т.о.} + \tau_p, \quad (3.37)$$

де  $\tau_3$  – тривалість завантаження, год;  $\tau_{п.в.}$  – попереднє витримання виробів у камері, год;  $\tau_{т.о.}$  – тривалість режиму теплової обробки, год;  $\tau_p$  – тривалість розвантаження камери, год.

Камери працюють в загальному технологічному ритмі з формувальним постом або лінією формування. Тому тривалість завантаження камери, год:





$$\tau_3 = \tau_\phi n / (M_\phi n_\phi), \quad (3.38)$$

де  $\tau_\phi$  – тривалість циклу формування виробу, год;  $M_\phi$ ,  $n$  – відповідно кількість формувальних установок і виробів в камері, шт.;  $n_\phi$  – кількість виробів, що формуються на одній установці за один цикл, шт.

Оскільки вироби розвантажують з камери в загальному технологічному ритмі (розпалубки і нового формування), то  $\tau_p = \tau_3$ .

Добова оборотність установки, год:

$$k_{\text{доб}} = 24/\tau_{\text{ц}}. \quad (3.39)$$

Коефіцієнт використання установки  $k_{\text{вик}} = 0,8 \dots 0,9$ .

Річна кількість циклів роботи установки:

$$k_p = \tau_{\text{рік}} \cdot k_{\text{вик}} / \tau_{\text{ц}}, \quad (3.40)$$

де  $\tau_{\text{рік}}$  – тривалість роботи однієї установки за рік, що залежить від кількості робочих днів і змін, год.

Річна продуктивність однієї установки, м<sup>3</sup>/рік, обумовлена разовим завантаженням камери і річною кількістю циклів роботи:

$$V_{\text{рі}} = V_{\text{б}} \cdot k_p. \quad (3.41)$$

Кількість установок, необхідних для виконання річної програми:

$$N = 1,1 \cdot (V_{\text{річ}} / V_{\text{рі}}). \quad (3.42)$$

Перевірку прогрівання виробу виконують за прийнятим режимом обробки з врахуванням теплоти екзотермічних реакцій гідратації в'язучого. Інтенсивність прогрівання визначають розрахунком температур поверхні і центра виробу як у період нагрівання, так і ізотермічного витримування (див. п.5.1):

$$t = f(Bi, Fo, \theta). \quad (3.43)$$

Далі знаходять характерний для прогрівання розмір  $R$ , а також коефіцієнт температуропроводності  $\alpha$  (див. п.5.1).

За критеріями  $Bi$  і  $Fo$  визначають безрозмірну температуру  $\theta$  (див. п.5.2), а потім температуру центра виробу наприкінці періоду, °С:

$$t_{\text{ц}} = \bar{t}_i - \theta_{\text{ц}} (\bar{t}_i - t_1); \quad (3.44)$$

і температуру поверхні виробу наприкінці періоду, °С:



$$t_{\text{ц}} = \bar{t}_i - \theta_{\text{ц}} (\bar{t}_i - t_1), \quad (3.45)$$

де  $\bar{t}_i$  – середня температура розрахункового періоду, °С;  $t_1$  – початкова температура розрахункового періоду, °С.

Середня температура виробу наприкінці періоду ( $t_{\text{в}} = 0,67 \cdot t_{\text{ц}} + 0,33 \cdot t_{\text{п}}$ ) використовується в розрахунку теплового балансу установки.

Оскільки тривалість прогрівання залежить від інтенсивності зовнішнього теплообміну, теплопровідності і товщини виробу, то тонкі вироби із щільного бетону прогриваються в період нагріву, а для товстих виробів прогривання продовжується і в період ізотермічного витримування. При відсутності зовнішнього теплообміну і великій товщині виробу центральні зони бетону можуть взагалі не прогрітися.

*Теплотехнічний розрахунок* камер складається з матеріального і теплового балансів для періоду нагріву та ізотермічного витримування (див. п. 7.3.4-7.3.5). Оскільки основна витрата теплоти відбувається в період нагріву, а в період ізотермічного витримування теплоносій подається для поповнення тепловтрат в навколишнє середовище, то витрати теплоносія (годинні і питомі) в цей період в декілька разів менші, ніж у період нагріву. Теплотехнічний розрахунок закінчують *гідравлічним розрахунком*, пов'язаним із визначенням діаметрів паропроводів, а також вибором регулюючої і запірної арматури.

Складаючи зведену таблицю теплового балансу, оцінюють частку теплоти по кожній статті витрат і намічають заходи для зменшення втрат.

*Аеродинамічний розрахунок*\* починають із креслення схеми повітроводів витяжної вентиляційної системи із вказанням розмірів всіх ділянок, перерізів, місцевих опорів. Потім розраховують витрати повітря по магістральним трубопроводам і відгалуженням, лінійні і місцеві опори на всіх ділянках.

Враховуючи загальний опір мережі і фактичну витрату повітря при даній температурі, підбирають вентилятор і визначають потужність електродвигуна.

Розраховуючи установки періодичної дії, що ґрунтуються на застосуванні термоформ (індивідуальних, пакетів, касетних установок), варто враховувати наступні особливості цих конструкцій: форми, в яких

---

\* Більш детально аеродинамічний розрахунок теплових установок розглянутий в першій частині даного інтерактивного комплексу.



прогріваються вироби, одночасно є конструкціями огорожень; в камерах можливе як двостороннє прогрівання, так і одностороннє – через одну або кілька розділових стінок; при обробці виробів в пакетах відбувається двостороннє прогрівання бетону, тобто знизу – подачею пари в термopіддон, зверху – через повітряний прошарок за рахунок теплоти термopформи, яка знаходиться вище.

Максимальна температура в теплових відсіках пов'язана з тиском у парових магістралях і складає 105...125°C. За експериментальними даними, при прогріванні бетону через повітряний прошарок товщиною до 30 мм температура бетонної поверхні нижча температури металу на 25...30°C або на 10...15°C температури поверхні, що безпосередньо стикається з металом. Температура центра виробу залежить від тепло- і теплопровідності бетону і тривалості прогрівання.

### 3.15.3. Розрахунок установок неперервної дії

Розрахунок горизонтальних одно- і багатоярусних щілинних, тунельних і вертикальних камер паропрогрівання і камер тепловологісної обробки прокатних станів починають з визначення кількості виробів, що знаходяться в камері (або камерах), шт.:

$$n = V_p \cdot \tau_{т.о} \cdot k_{вик} / (V_{бі} \cdot \tau_p), \quad (3.46)$$

де  $V_{рик}$  – річна продуктивність цеху, обладнаного даними камерами, м<sup>3</sup>/рік;  $V_{бі}$  – об'єм бетону в одному виробі, м<sup>3</sup>;  $\tau_{т.о}$  – тривалість режиму тепловологісної обробки, год. (оскільки установка працює неперервно, то тривалість завантаження і вивантаження не враховують);  $\tau_p$  – річний фонд роботи часу, що залежить від кількості робочих днів і формувальних змін, год.;  $k_{вик}$  – коефіцієнт використання установки, рівний 0,85...0,95.

Кількість виробів, шт., що знаходяться в одній камері, визначається продуктивністю формувальної лінії  $G_{год}$ , шт/год, що залежить від технологічного ритму формування:

$$n_i = G_{год} \cdot \tau_{т.о} = (60/R) \cdot \tau_{т.о}, \quad (3.47)$$

де  $R$  – ритм конвеєра.

Необхідна кількість камер, шт.:

$$N_k = n/n_i. \quad (3.48)$$



Довжина горизонтальної камери, м, не повинна перевищувати 127 м і залежить від кількості ярусів  $n_{я}$ :

$$L_k = n_{я} l_{\phi} / n_{я}, \quad (3.49)$$

де  $l_{\phi}$  – довжина форми-вагонетки, м (на 0,5 м повинна перевищувати довжину виробу).

Ширина камери, м,

$$B_k = b_{\phi} + 2b_1, \quad (3.50)$$

де  $b_{\phi}$  – ширина форми-вагонетки, м;  $b_1$  – проміжок між формою-вагонеткою і стінкою, м, рівний 0,15...0,2, а при установці бокових реєстрів – 0,3...0,4.

Висота камери, м,

$$H_k = h_1 + n_{я} (h_p + h_{\phi} + h_2) - h_2 + h_3, \quad (3.51)$$

де  $h_1$  – висота рейкового шляху від підлоги камери, м;  $h_p$  – висота рейки, м ( $h_p = 0,18$ );  $h_{\phi}$  – висота форми-вагонетки, м;  $h_2$  – проміжки між формами-вагонетками, м;  $h_3$  – відстань від верхньої поверхні виробу до стелі камери, м.

В установках неперервної дії кожен етап тепловологісної обробки виробу проходять у відповідній зоні. Довжина зони, м, визначається співвідношенням тривалості етапу до загальної тривалості циклу:

$$L_i = L_k \cdot (\tau_i / \tau_{ц}), \quad (3.52)$$

де  $\tau_i$  – тривалість стадії теплової обробки, год.

Вертикальні камери при 2-х штабельній схемі (див. п.3.13.2) мають довжину, м:

$$L_k = 2l_{\phi} + 3l_1, \quad (3.53)$$

де  $l_{\phi}$  – довжина форми-вагонетки, м;  $l_1$  – вільні проміжки в камері, м, рівні 0,5...0,6.

Ширина камери, м:

$$B_k = b_{\phi} + 2b_1, \quad (3.54)$$

де  $b_{\phi}$  – ширина форми-вагонетки, м.

Висота камери, м:

$$H_k = n_{я} h_{\phi} + (n_{я} + 1)h_1 + h_2, \quad (3.55)$$



де  $h_{\phi}$  – висота форми, м;  $n_{я}$  – кількість ярусів, шт.;  $h_1$  – висота консолі поворотних пристроїв і відстань від форми до підлоги камери і стелі, м ( $h_1 = 0,2$ );  $h_2$  – висота машинного відділення, м ( $h_2 = 1,8$ ).

Для визначення розмірів зон тепловологісної обробки визначають кількість виробів, що знаходяться в зоні ізотермічної витримки, шт.:

$$n_{із} = n_i \cdot (\tau_{із} / \tau_{ц}), \quad (3.56)$$

де  $\tau_{із}$  – тривалість ізотермічної витримки, год.

Довжина зони ізотермічної витримки, м:

$$L_{II} = n_{із} \cdot (h_{\phi} + h_1). \quad (3.57)$$

Оскільки в цій зоні вироби розподіляються по двом пакетах, то висота зони  $H_{із} = L_{із}/2$ , м.

Висота зони нагрівання і охолодження, м:

$$H_{н} = H_{ох} = H_{к} - H_{із} - h_2. \quad (3.58)$$

Матеріальний і тепловий баланси установок неперервної дії складають для зон нагріву та ізотермічної витримки на 1 год. роботи. Тому при їх складанні враховують годинну витрату бетону, арматури, вагонеток, а тепловтрати визначають з відрізка камери, який виріб проходить за 1 год. При роботі установки огороження знаходяться в стаціонарних теплових умовах, отже, статтю по визначенню витрати теплоти на нагрівання огорожень з теплового балансу виключають.

Після визначення годинної витрати теплоти в кожній зоні приступають до вибору і розрахунку системи подачі теплоти. Якщо камери мають електронагрівання, то визначають потужність і кількість електронагрівачів. Питома витрата електроенергії на обробку виробів складає близько  $100 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ , а сумарна потужність нагрівачів – близько  $1000 \text{ кВт}$ . При нагріванні камер продуктами згоряння природного газу витрати газу розраховують так само, як і для установок періодичної дії, а потім підбирають теплогенератори.

При прогріванні камер "глухою" парою розраховують поверхню тепловіддачі регістрів,  $\text{м}^2$ :

$$F_{\text{рег}} = Q / [3,6 \cdot k_{\text{рег}} \cdot (t_{\text{п}} - t_{\text{I,II}})], \quad (3.59)$$

де  $Q$  – необхідна кількість теплоти,  $\text{кДж}/\text{год}$ ;  $k_{\text{рег}}$  – коефіцієнт теплопередачі через металеву стінку,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , рівний  $1,67$ ;  $t_{\text{п}}$  – температура поверхні регістра,  $^\circ\text{C}$ , що залежить від тиску пари і скла-





дає  $115...150^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{II}}$  – температура в камері у відповідний період обробки,  $^{\circ}\text{C}$ .

Регістри виготовляють із труб діаметрами 76 або 100 мм і довжиною 5 м. Знаючи необхідну поверхню тепловіддачі регістрів, а також поверхню тепловіддачі 1 м труби обраного діаметра, визначають загальну довжину труб, а потім кількість регістрів. З 1 м<sup>2</sup> сумарної поверхні гладких труб регістрів виділяється 4000...4500 кДж/год.

Якщо прогрівання камер здійснюється "гострою" парою, то після розрахунку подавальних паропроводів (див. п. 7.3.6) розраховують перфоровані паропроводи. При цьому визначають сумарну площу отворів для випуску пари, їх кількість, довжину перфорованої труби, враховуючи, що отвори діаметром 3...5 мм розташовані з кроком 150...200 мм, а через 1 мм<sup>2</sup> отвору виходить за годину 1,6...1,7 кг пари.

В невисоких одноярусних камерах торці захищають механічною або гумовою шторою від виходу теплого повітря і підсмоктування холодного, а при великих отворах встановлюють повітряні завіси.

При розрахунку камер тепловологісної обробки вібропрокатних станів визначають передачу теплоти через герметизуючу гумову стрічку товщиною 10 мм,  $\rho_0 = 1200 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda = 0,163 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$ ,  $c = 1,38 \text{ кДж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)}$ , а також через формуючу металеву стрічку, що має коефіцієнт теплопередачі від пари до бетону близько  $350 \text{ Вт/(м}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$ . Високий рівень коефіцієнта теплопередачі можливий при дотриманні чистоти поверхонь, щільного притиску верхньої стрічки, продування повітря і закриття торців камери.

#### **3.15.4. Розрахунок установок електротеплової обробки**

Розрахунок установок теплової обробки бетонів, що використовують різні способи перетворення електричної енергії в теплову, має як загальні, так і етапи, що відрізняються.

В загальному вигляді розрахунок зводиться до складання і розв'язання рівняння теплового балансу для визначення необхідної кількості теплоти для всього процесу або його періодів, а потім, виходячи з конструкції установки, розраховують кількість генераторів інфрачервоного випромінювання, кількість витків індуктора або потужність трансформаторів для електродного прогрівання.

*Розрахунок установок інфрачервоного обігрівання (див. п. 3.14.2) складається з вибору генераторів, визначення їх потужності, кількості і розташування щодо поверхонь нагрівання і рефлекторних поверхонь.*



Енергетичні і геометричні параметри установок повинні сприяти створенню на поверхні нагрівання необхідної освітленості.

Необхідну *енергетичну освітленість*  $E$ , кДж/м<sup>2</sup>, визначають в періоди:

– підйому температури

$$E_1 = [3,15 / (\varepsilon F_n)] \cdot P_1; \quad (3.60)$$

– ізотермічного витримування

$$E_2 = [5,25 / (\varepsilon F_n)] \cdot P_2, \quad (3.61)$$

де  $\varepsilon$  – ступінь чорноти поверхонь, що сприймають інфрачервоне випромінювання;  $P_1, P_2$  – необхідна теплова потужність відповідно в період нагрівання та ізотермічного витримування, кДж/год;  $F_n$  – площа нагрівання, м<sup>2</sup>.

Потім, вибравши схему обігрівання, визначають коефіцієнт опромінення  $\varphi$ . Так, для металевих ТЕНів діаметром 18 мм, встановлених на відстані 0,25 м один від одного і 0,05 м від відбивачів з окисленого алюмінію ( $\varepsilon = 0,2$ ), відбиваюча поверхня яких паралельна поверхні нагрівання на відстані 0,25 м,  $\varphi = 0,51 \dots 0,56$ .

Потужність інфрачервоної установки, Вт, необхідна для створення потрібної енергетичної освітленості на поверхні нагрівання в розрахунковий період:

$$W = 1,453 \cdot (E/\varphi) \cdot F_n, \quad (3.62)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт опромінення, що показує яка частина променевої енергії, що генерується інфрачервоним випромінюванням, потрапляє на поверхню нагрівання.

Потім визначають тип інфрачервоних випромінювачів і їх кількість. Потужність 1 м довжини ТЕНів складає 0,6...1,2 кВт, 1 м довжини карборудного випромінювача – 10 кВт.

В *індукційних системах* (див. п. 3.14.3) металева камера теплової обробки або виробу в металевих формах знаходяться в порожнині індукційної обмотки, виконаної у вигляді циліндричного або прямокутного соленоїда. Розрахунок ведуть за схемою індуктивної котушки із залізом, визначаючи наступні параметри індукційної системи: число витків індукційної обмотки (індуктора) при заданому режимі термообробки (швидкості підйому температури, температурі ізотермічного витримування) і обраній напрузі  $U$ ; сила струму в індукторі  $I$ ; площа



перерізу індуктора  $S_i$ ; коефіцієнт потужності  $\cos\varphi$ ; повна потужність системи  $P_c$ ; потужність  $P_k$  і ємність  $C_k$  батареї конденсаторів для компенсації реактивної потужності.

Розрахунок *електродного прогрівання* (див. п. 3.14.1) також починають із визначення необхідної кількості теплоти для кожного періоду обробки і параметрів впливу струму, при яких виділена кількість теплоти дорівнює необхідній:

$$Q = 3,6IU \cdot \tau, \quad (3.63)$$

де  $I$  – відповідно сила струму, А,  $U$  – напруга, В;  $\tau$  – час прогрівання, год.

Розрахунок електродного прогрівання залежить від виду електродів і способів їх установки. При електропрогріванні за допомогою пластинчастих електродів питома електрична потужність, що виділяється:

$$P = U^2 \cdot 10^{-3} / (b^2 \rho_3), \quad (3.64)$$

де  $b$  – відстань між електродами, см;  $\rho_n$  – питомий опір бетону ( $\rho_n = 2 \dots 12 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ).

Питома електрична потужність при наскрізному прогріванні смуговими електродами:

$$P = U^2 \cdot 10^{-3} / \left[ \rho_3 B^2 \left( 1 + \frac{\alpha b}{\pi B} \ln \frac{b}{2a} \right) \right], \quad (3.65)$$

де  $B$  – товщина шару бетону, що прогривається, см;  $b$  – відстань між смугами електродів, см;  $a$  – ширина смугового електрода, см.

Необхідна питома потужність,  $\text{кВт/м}^3$ , для прогрівання  $1 \text{ м}^3$  бетону у формі, враховуючи тепловтрати:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{\bar{o}} + P_{\phi} + P_{н.с} - P_e = \\ &= 0,286 \cdot 10^{-3} K_p \left[ c_{\bar{o}} \rho_{\bar{o}} + \frac{c_{\phi} \rho_{\bar{o}} M_n \delta_{\phi}}{2} + \right. \\ &\quad \left. + 1,8 K M_n \left( \frac{t_1 + t_2}{2} - t_{н.с} \right) - 0,2 \right] \end{aligned} \quad (3.66)$$

де  $P_{\bar{o}}$ ,  $P_{\phi}$ ,  $P_{н.с}$  – потужність для нагрівання бетону, форм і на втрати в навколишнє середовище,  $\text{кВт/м}^3$ ;  $P_e$  – потужність, еквівалентна теплоті екзотермії,  $\text{кВт/м}^3$ ,  $P_e \approx 0,2$ ;  $c_{\bar{o}}$ ,  $c_{\phi}$  – питома теплоємність бетону і форм,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\rho_{\bar{o}}$ ,  $\rho_{\phi}$  – середня густина бетону і форм,  $\text{кг/м}^3$ ;  $M_n$  – модуль поверхні конструкції (відношення площі поверхні до об'єму),



$l/m$ ;  $\delta_{\phi}$  – товщина стінок форми, м;  $\kappa$  – коефіцієнт теплопередачі від бетону через теплоізольовану форму в навколишнє середовище, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_{н.с}$  – температура початку нагрівання, ізотермічного витримування і навколишнього середовища.

Напруга, що підводиться до електродів, В:

$$U = \sqrt{P_1 / R}, \quad (3.67)$$

де  $R = bp/B$  – електричний опір між електродами, Ом;  $b$  – відстань між смугами електродів, см;  $B$  – товщина шару бетону, що прогривається, см;  $\rho$  – питомий опір бетону, Ом·м.

В період ізотермічного витримування необхідна питома потужність, кВт/м<sup>3</sup>:

$$P_2 = 0,286 \cdot 10^{-3} \kappa M_{п}(t_2 - t_{н.с}). \quad (3.68)$$

Питома витрата електроенергії, для прогрівання бетону, Вт/м<sup>3</sup>:

$$W = P_1 \tau_1 + P_2 \tau_2, \quad (3.69)$$

де  $\tau_1$  і  $\tau_2$  – відповідно тривалість нагрівання і ізотермічного витримування.

При розрахунку електропрогрівання бетону за допомогою термовідсіків, касет або пакетувальників визначають питому потужність  $P_1$ , по формулі (3.66), розрахункову потужність  $P_{відс}$  на відсік відповідно до об'єму бетону, що прогривається, а потім потужність, що припадає на одну фазу, кВт:

$$P_{\phi} = P_{відс} / 3. \quad (3.70)$$

Сила струму в одному нагрівальному елементі відсіку, А,

$$I_e = 1000 P_{\phi} / (U_{\phi} n), \quad (3.71)$$

де  $U_{\phi}$  – напруга фази, В;  $n$  – кількість елементів, шт.

Опір елемента, що нагрівається, Ом:

$$R_e = U_{\phi} / (n I_e). \quad (3.72)$$

Переріз нагрівального елемента, мм<sup>2</sup>:

$$S = I_e / \rho_{н}, \quad (3.73)$$

де  $\rho_{н}$  – питомий опір нагрівача, Ом/(мм<sup>2</sup>·м), що залежить від виду металу (сталь, константан, ніхром), рівний 0,11...1,1.

Довжина нагрівального елемента, м:



$$l = R_e S / \rho_{\text{роб}}, \quad (3.74)$$

де  $\rho_{\text{роб}}$  – питомий опір нагрівача, Ом/(мм<sup>2</sup>·м), при робочій температурі 400...900°C.

Для періоду ізотермічного витримування необхідна потужність, як правило, не перевищує потужності періоду нагрівання, тому додатковий розрахунок не потрібний.

### 3.15.5. Розрахунок автоклавів

Виконуючи *конструктивний розрахунок* автоклава (див. п. 3.12.5), необхідно прагнути, щоб коефіцієнт його заповнення був максимальним. Для цього при завантаженні одночасно використовують різні номенклатуру і типорозміри виробів. На початку викреслюють поперечний (рис. 3.53) і поздовжній ескізи укладання виробів, укладаючи при необхідності кілька виробів в один ряд, потім визначають тип і характеристики автоклава.

Середній коефіцієнт заповнення автоклавів складає 0,35...0,45, а коефіцієнт обороту при виготовленні пінобетону складає 1,3, газобетону – 1,4...2,0. Оборотність автоклавних установок залежить від режимів теплової обробки виробів (див. табл. 7.9-7.10).

Тривалість циклу теплової обробки  $\tau_{\text{т.о.}}$ , добовий коефіцієнт обороту і річну продуктивність однієї установки, а також кількість установок розраховують так само, як і для установок періодичної дії (див. п. 3.15.2).

Параметри прогрівання виробів визначають, враховуючи теплофізичні характеристики автоклавних матеріалів (див. табл. 3.2).

Розрахунок теплового балансу автоклава здійснюється за загальною методикою (див. п. 7.3.5). Однак у зв'язку з високими температу-

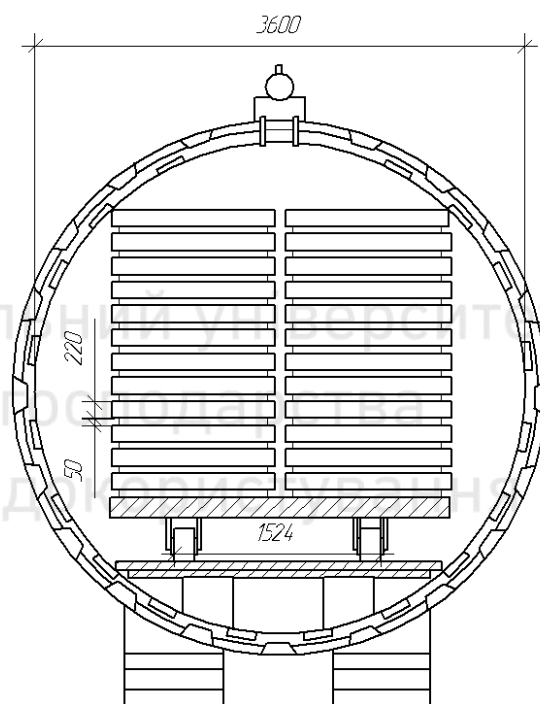


Рис. 3.53. Поперечний ескіз укладки виробів в автоклаві





рами і деякими складнощами процесу визначення тепловтрат в навколишнє середовище такий розрахунок має доповнення.

Теплоту, що витрачається автоклавом в навколишнє середовище при підвищенні температури, яка відповідає тиску ізотермічного витримування, а також в період витримування, розраховують в такий спосіб.

Визначають коефіцієнт теплопередачі теплової ізоляції:

$$k_1 = \frac{1}{\delta_{iz} / \lambda_{iz} + 1 / \alpha_2}, \quad (3.75)$$

де  $\delta_{iz}$  – товщина шару ізоляції, м, що залежить від теплофізичних характеристик матеріалу,  $\delta_{iz} = 0,12 \dots 0,16$ ;  $\lambda_{iz}$  – теплопровідність матеріалу ізоляції, Вт/(м·°С).

$$\lambda_{iz} = 0,163 + 0,000185 \cdot t'_{cp}, \quad (3.76)$$

де  $t'_{cp}$  – середня температура автоклава в кожен період, °С;

$$t'_{cp} = (t_{cp} + t_{iz}) / 2, \quad (3.77)$$

$t_{iz}$  – температура ізоляції, °С, початкова температура  $\sim 40$  °С.

Для розрахунку теплового потоку, Вт/(м<sup>2</sup>·°С), що втрачається автоклавом, який знаходиться в закритому приміщенні, можна користуватися наближеною емпіричною формулою:

$$\alpha_2 = 9,74 + 0,07(t_{вир} + t_{п}) / 2, \quad (3.78)$$

де  $t_{вир}$  – температура виробів в автоклаві, °С;  $t_{п}$  – температура повітря в цеху, °С.

Тепловий потік, Вт, що проходить через поверхню автоклава в період підвищення температури від 100°С до  $t_{iz.в}$  (температура, що відповідає максимальному тиску при ізотермічному витримуванні), складе:

$$Q_{пов} = k_1 [(t_{iz.в} + 100) / 2 - t_{п}] S, \quad (3.79)$$

де  $S$  – площа поверхні автоклава, м<sup>2</sup>;  $S = \pi D L_{авт} + 2 S_{кр}$ ,  $L_{авт}$  – робоча довжина автоклава, м;  $S_{кр} = (\pi D^2) / 4$  – площа кришки автоклава, м<sup>2</sup>.

Загальна теоретична кількість теплоти на процес запарювання, кДж:

$$Q = \sum_n^i Q_i. \quad (3.80)$$



Ентальпію конденсату  $\Gamma$ , що утвориться при температурі ізотермічного витримування, визначають за *табл. 3.1* (як різницю між тепловою пароутворення і ентальпією пари  $I_{\text{п}}$ ). Кількість теплоти, кДж, що віддається 1 кг пари при її конденсації складе (теплота пароутворення):

$$Q_{\text{п}} = I_{\text{п}} - \Gamma. \quad (3.81)$$

Розв'язуючи рівняння теплового балансу, визначають необхідну кількість теплоти  $Q$ .

Теоретична витрата пари, кг, на 1 цикл роботи автоклава:

$$D_{\text{т}} = Q / Q_{\text{п}}. \quad (3.82)$$

По виконаному теоретичному розрахунку практична витрата пари за 1 цикл роботи:

$$D_{\text{ф}} = 1,35D_{\text{т}}. \quad (3.83)$$

Далі визначають годинну витрату пари, а на основі гідравлічного розрахунку – діаметри паропроводів і конденсатопроводів.

### 3.16. ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ПРИ ТЕПЛОВІЙ ОБРОБЦІ БЕТОНУ

#### 3.16.1. Основні напрямки зменшення витрат тепла

Витрати на тепловологісну обробку виробів складають близько 70% загального енергобалансу підприємства. Для зниження енерговитрат необхідно використовувати резерви по вдосконалюванню організації і технології робіт, обладнання для теплової обробки залізобетонних виробів. Можна виділити декілька напрямків зниження тепловитрат.

**Перший** передбачає зменшення фактичних витрат теплової енергії шляхом нормалізації теплоспоживання на основі норм витрати теплової енергії. Домогтися цього можна розробкою норм енергобалансу підприємств і заходів, що забезпечують їх виконання; впорядкуванням системи обліку витрати теплової енергії; усуненням недоліків в системах паропостачання, паророзподілу, автоматизації тощо. Впровадження цих заходів дозволяє знизити енерговитрати до 15...30%.



**Другий** напрямок полягає у впровадженні ефективних камер тепловологісної обробки з підвищеними теплозахисними властивостями огорожень. Ефективні конструкції стін і кришок пропарювальних камер дозволяють знижувати витрати теплової енергії на 20...25 % в порівнянні із звичайними камерами.

Застосування камер з підвищеними теплозахисними властивостями дозволяє ефективно використовувати термосні режими теплової обробки виробів. З огляду на те, що в промисловості збірного залізобетону переважна більшість ямних пропарювальних камер характеризуються добовим коефіцієнтом обороту 1...1,5, а вироби знаходяться в них 12...20 год., то інтенсивне нагрівання й ізотермічне витримування при 80...90°C стають не обов'язковими. Температуру нагрівання виробів приймають такою, щоб за період термосного витримування бетон набрав необхідну міцність. Тому в залежності від багатьох факторів (маси і матеріалу огорожень камер, металу форм і бетону виробів, його виду і марки, виду і витрати цементу, його тепловиділення, коефіцієнта завантаження камер, тривалості термосного витримування) температура розігріву бетону виробів може бути в межах 40...80°C при подальшому термосному витримуванні без подачі пари в розігріту камеру, яка далі повільно остигає.

В табл. 3.7 наведені розрахункові температури розігріву виробів з важкого бетону в камерах при термосній технології.

Таблиця 3.7

Розрахункові температури розігріву виробів

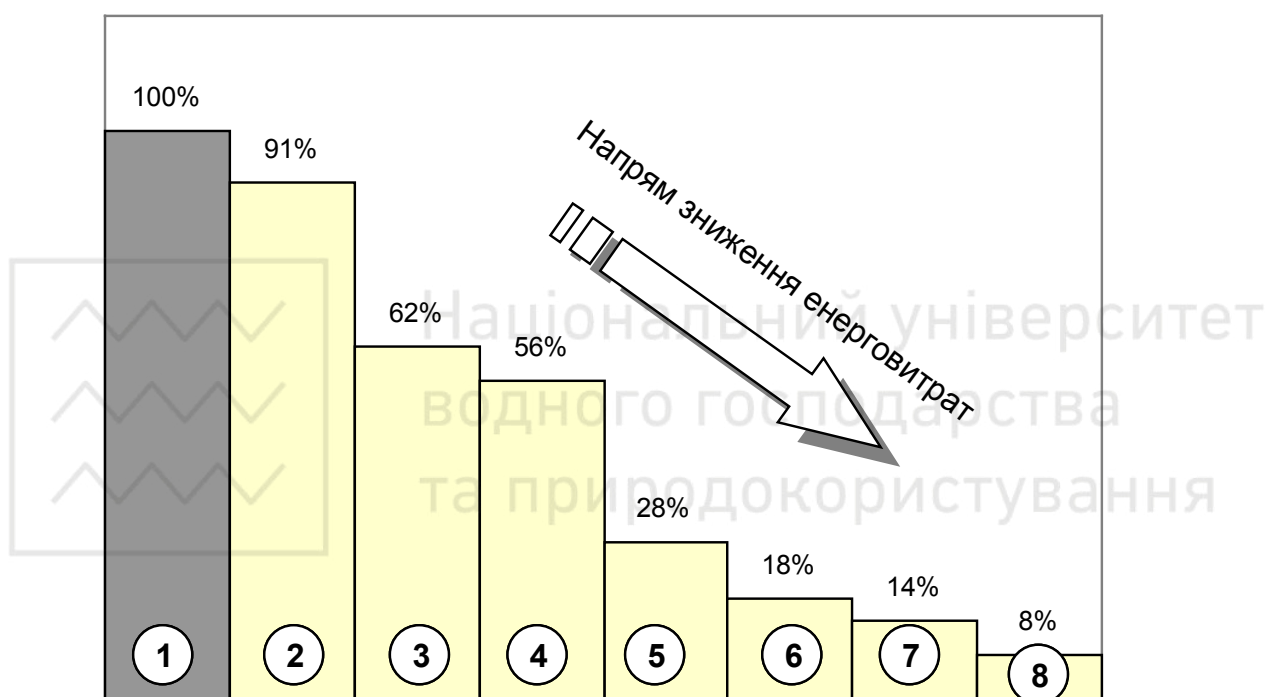
Коефіцієнт обороту камери	Відносна міцність бетону, % від R <sub>28</sub>	Розрахункова температура розігріву виробів, °C при класі бетону			
		B15	B25	B30	B40
1	50	30...45	25...40	25...35	20...30
	70	70...80	60...80	45...65	40...60
1,5	50	40...50	40...45	35...45	30...40
	70	—	80...90	70...80	55...70
2	50	55...60	50...55	45...50	40...45
	70	—	—	—	65...80

При застосуванні термосних режимів необхідно максимально знизити надходження повітря з цеху в камеру, що остигає, через нещільності в кришці, стінках, гідравлічних затворах камери, а для зниження температурних перепадів бажано забезпечити циркуляцію середовища в камері.



**Третій** напрямок економії енергоресурсів передбачає використання енергозберігаючих режимів теплової обробки виробів збірного залізобетону, використання інших (крім пари) теплоносіїв, джерел енергії. Це дозволяє додатково знизити споживання теплоти на 10...20%.

Таким чином, застосування комплексу заходів щодо зниження енерговитрат дозволяє скоротити витрати енергії на теплову обробку бетону в 3...5 разів (рис. 3.54) [1]. Додаткові резерви по зниженню енерговитрат закладені в освоєнні відомого теплоносія – продуктів згоряння природного газу. За цією технологією витрати природного газу



**Рис. 3.54.** Діаграма енерговитрат при тепловій обробці збірного залізобетону (в порівняльних одиницях)

1 – звичайні ямні камери; 2 – технічно справні; 3 – з регулюванням паропостачання; 4 – з ефективними системами паророзподілу; 5 – з ефективним утепленням; 6 – термосні камери; 7 – прогрівання продуктами згоряння газу в термосній камері; 8 – геліотермообробка з догріванням продуктами згоряння газу

на теплову обробку знижуються в 3...4 рази у порівнянні із пропарюванням. Тепловий баланс підприємства зменшується на 20...25% за рахунок виключення втрат, пов'язаних із транспортуванням теплоносія.

До перспективних способів теплової обробки, що знижують енерговитрати, варто також віднести використання електроенергії, геотермальних вод, сонячної енергії тощо.



### **3.16.2. Ефективні рішення огорожувальних конструкцій камер теплової обробки**

Одним з основних факторів економії теплової енергії є зменшення її втрат в навколишнє середовище. Як правило, причини малого теплового ККД пропарювальних камер полягають, в основному, в тепло-технічних властивостях конструкцій огорожень. Тому для усунення непродуктивних втрат енергії необхідно підвищити тепловий опір огорожень пропарювальних камер і знизити їхню теплову ємність, що можливо шляхом захисту огорожень камер різними теплоізоляційними матеріалами або заміною важкого бетону матеріалами з кращими теплозахисними характеристиками.

Матеріали, що застосовуються для теплоізоляції огорожувальних конструкцій пропарювальних камер, повинні відповідати наступним вимогам:

- мати задані механічні і теплофізичні властивості;
- не руйнуватися під дією температури і можливого зволоження в процесі експлуатації;
- мати термін служби не нижче нормативного терміну експлуатації камер.

Для теплоізоляції камер можуть бути застосовані наступні матеріали: плити з мінеральної вати на синтетичному зв'язуючому; плити з пінопласту на основі резольних фенолформальдегідних смол; термостійкі заливні пінопласти; пінобетон; піноскло.

Основним критерієм для призначення товщини шару теплової ізоляції є тепла ефективність утепленого огороження і мінімальна вартість експлуатації камери. При внутрішньому розташуванні ізоляції стінок камери необхідно враховувати можливість звуження внутрішніх габаритів установки.

Вартість експлуатації утепленого надземного огороження складається з вартості теплової енергії і амортизаційних витрат на влаштування теплової ізоляції, включаючи гідроізоляцію. Товщина ізоляції, що відповідає найменшій сумарній вартості експлуатації, називається *економічною товщиною*.

На даний час рекомендуються наступні варіанти **стінових огорожувальних конструкцій** камер паропрогріву:

1) з високоміцного керамзитобетону класу В15 і вище (густина до  $1500 \text{ кг/м}^3$ ), що володіє в 1,5 рази меншою, ніж у важкого бетону, теплоємністю, і в 3...4 рази меншою теплопровідністю;





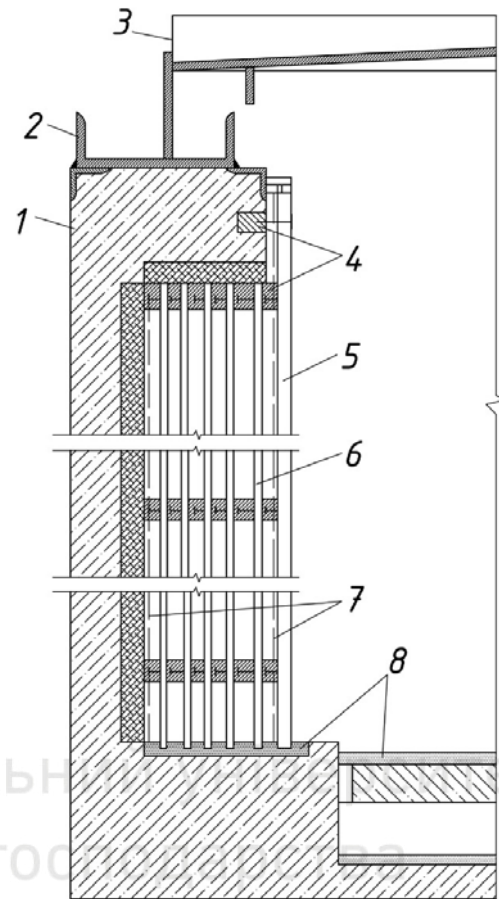
2) з важкого бетону із внутрішнім теплоізоляційним шаром, захищеним від зволоження (листовою сталлю, паростійкими покриттями);

3) з важкого або високоміцного легкого бетону із зовнішньою теплоізоляцією огорожень мінераловатними плитами і захисною стінкою із щільного азбестоцементного листа;

4) складена стінка з екранною ізоляцією (рис. 3.55), що має зовнішнє бетонне огороження, внутрішній азбестоцементний лист і повітряну порожнину між ними, розділену по товщині на кілька замкнутих повітряних прошарків екранами з легких тонких полімерних матеріалів, покритих алюмінієвою фольгою або фольгоізолем для зменшення випромінюючої складової. Покриття наноситься на поверхні, що утворюють повітряну порожнину, тобто спрямовані одна на іншу. Для створення надійного паронепроникнення огорожень стик азбестоцементних листів повинен виконуватися з антисептованих дерев'яних закладних брусків. Шви між листами повинні бути забиті мастикою типу перманід або цементно-піщаним розчином з добавкою рідкого скла.

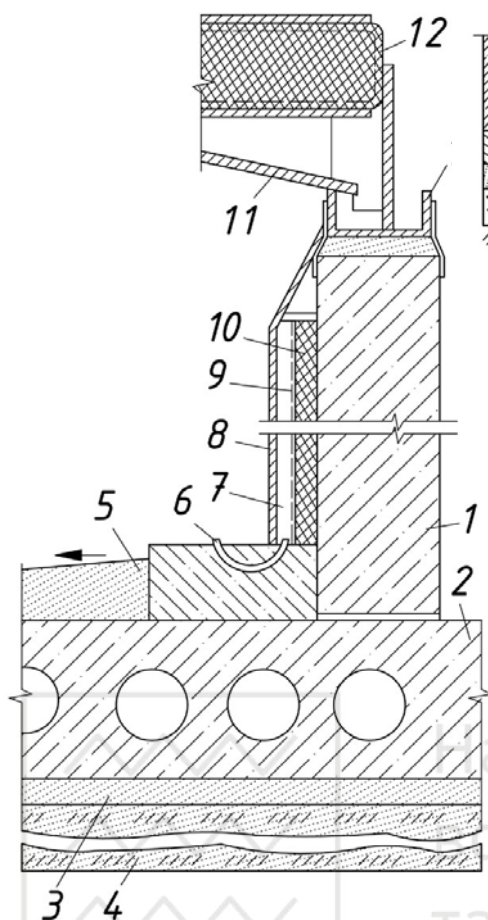
5) складена стінка з зовнішнім бетонним огороженням і шаром теплоізоляції з внутрішньої сторони (рис. 3.56), захищена гідро- і пароізоляційним матеріалом (перегородки блоку камер мають теплоізоляційні шари з двох сторін). Дана конструкція передбачає теплоізоляцію з напівтвердих мінераловатних плит товщиною 60 мм із гідрозахистом теплоізоляції листовою сталлю товщиною 3 мм і фольгоізолем або алюмінієвою фольгою, наклеєною на мінераловатні плити.

Повітряна порожнина між листовою сталлю і теплоізоляційним матеріалом необхідна для видалення конденсату при випадковому прониканні пари в результаті розгерметизації сталеві обшивки. Повітряна порожнина повинна з'єднуватись з робочим об'ємом камери за допомогою U-подібних патрубків для відводу конденсату і вентиляції. В робочому стані патрубки повинні бути заповнені водою і служити гід-



**Рис. 3.55.** Зовнішнє огороження камери з екранною ізоляцією:

1 – залізобетон; 2 – гідрозатвор; 3 – кришка; 4 – дерев'яні бруски; 5 – азбестоцементний лист; 6 – екрани; 7 – фольгоізол; 8 – цементна стяжка

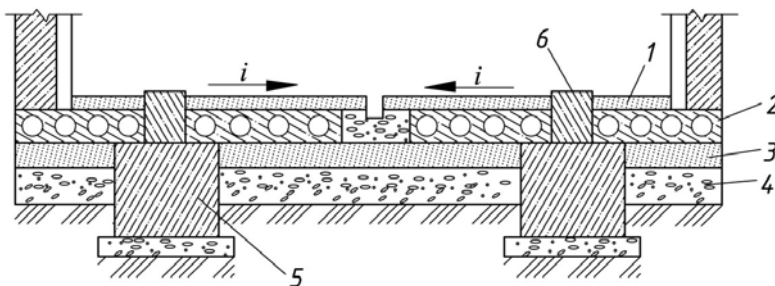


**Рис. 3.56.** Конструктивні елементи камер з теплоізоляційними матеріалами:

1 – зовнішня стіна; 2 – пустотна панель із легкого бетону; 3 – піщана підготовка; 4 – керамзитовий гравій; 5 – цементна стяжка; 6 – U-подібний патрубок, що з'єднує повітряний прошарок з атмосферою; 7 – повітряний прошарок; 8 – сталева обшивка; 9 – фольгоізол; 10 – утеплювач; 11 – металевий екран; 12 – кришка; 13 – гідрозатвор

нолітна залізобетонна плита або, в збірному варіанті, покладені на підсіпку фундаментні балки, на яких встановлюють опорні балки (рис. 3.57). Для підвищення теплоізоляційних властивостей днища використовують керамзитобетонні багатопустотні плити, блоки з піноскла або інших аналогічних матеріалів.

У випадку застосування повітряної порожнини для підвищення теплозахисних властивостей днища використовують тонкостінні ребристі або плоскі плити покриття (рис. 3.58), що утворюють друге днище



**Рис. 3.57.** Конструкція днища камери з утепленням

1 – цементна стяжка; 2 – керамзитобетонні плити; 3 – піщана підготовка; 4 – керамзитовий гравій; 5 – фундаментна балка; 6 – опорна балка

розотворами між повітряним прошарком огороження і внутрішньою частиною камери.

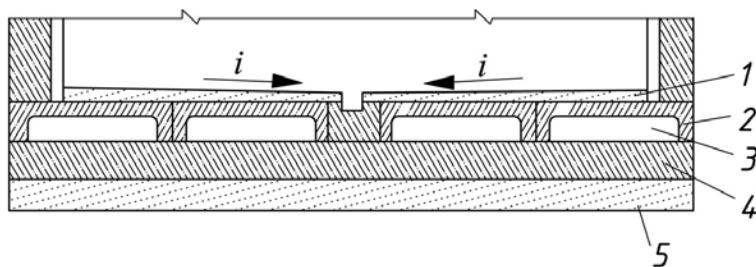
Паро- і гідрозахист теплоізоляційних матеріалів стін камер може бути виконаний фактурним бетонним (розчинним) шаром з гідрозахисним латексним покриттям. При цьому заощаджується метал, але збільшуються експлуатаційні витрати на відновлення і ремонт пароізоляції, довговічність якої невисока.

**Днища** пропарювальних камер виконують з монолітного (або збірного) залізобетону з підсіпкою зі шлаку або керамзитового гравію, а також зі створенням повітряної порожнини між підлогою і основою.

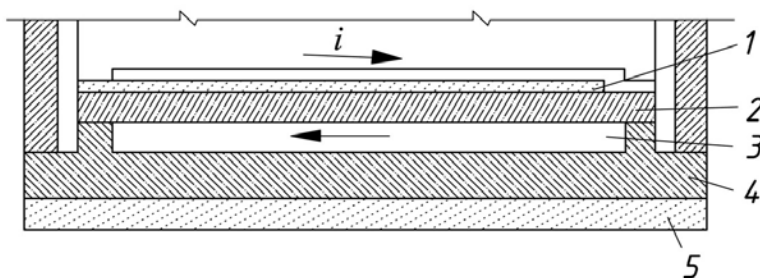
Основою днища може служити монолітна залізобетонна плита або, в збірному варіанті, покладені на підсіпку фундаментні балки, на яких встановлюють опорні балки (рис. 3.57). Для підвищення теплоізоляційних властивостей днища використовують керамзитобетонні багатопустотні плити, блоки з піноскла або інших аналогічних матеріалів.

У випадку застосування повітряної порожнини для підвищення теплозахисних властивостей днища використовують тонкостінні ребристі або плоскі плити покриття (рис. 3.58), що утворюють друге днище

а)



б)



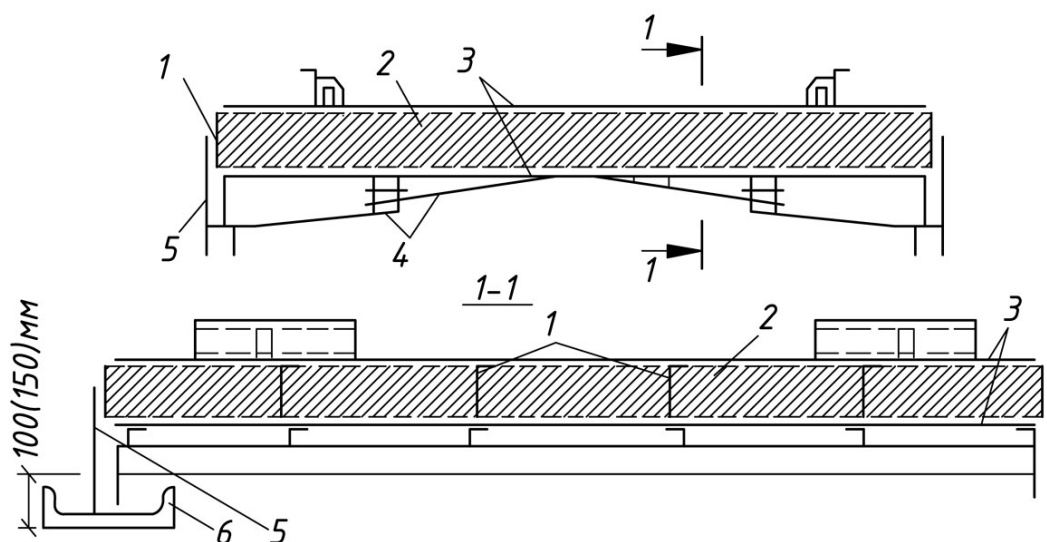
**Рис. 3.58.** Конструкції дна камери з повітряними прошарками:

а – днище з ребристими плитами; б – днище з плоскою плитою; 1 – цементна стяжка; 2 – ребриста (для а), плоска (для б) плита; 3 – повітряний прошарок; 4 – днище з керамзитобетону; 5 – піщана підготовка

(фальш-днище). Плити також захищають цементною стяжкою, покладеною з ухилом для стоку конденсату.

Для гідроізоляції днища можна застосувати бутилкаучукову плівку або гідробутил. Ці матеріали необхідно захищати від механічних впливів. При наявності ґрунтових вод теплоізоляцію підземної частини камери зсередини і зовні гідроізольють. Зовні підземної частини застосовують руберойд на бітумній мастиці або двократно покриття гарячим бітумом.

**Кришки** пропарювальних камер (рис. 3.59) повинні бути достатньо жорсткими, мати металевий каркас і теплоізоляційний шар, захищений із двох сторін



**Рис. 3.59.** Схема конструкції плоскої кришки ямної камери

1 – металевий каркас; 2 – мінераловатна плита; 3 – нижня і верхня сталеві обшивки; 4 – сталеві екрани; 5 – опорне ребро; 6 – швелер гідравлічного затвора



вими листами товщиною 3...4 мм. Кришки можуть бути плоскими або двосхилими. Плоскі виконують з підвісним похилим екраном з металевих листів для відводу конденсату в гідрозатвор. Двосхилі кришки більш жорсткі і мають каркаси з легких сталевих форм.

Гідрозатвор виконується зі швелера з висотою полиці не менш 100 мм. Для камер на полігонах зовнішнє ребро затвора на зовнішніх стінках роблять нижчим внутрішнього для зливу з порожнини затвора атмосферної вологи.

В камері з теплоізоляційними огороженнями за 3 год. подачі пари виробу нагріваються до такої ж температури, як у камерах з неізолюваними огороженнями за 5 год.; остигання відбувається зі швидкістю вдвічі меншою; непродуктивні витрати теплоти на розігрів конструкцій камери, тепловтрати за кожен цикл пропарювання вдвічі менші.

Слід зазначити, що огорожувальні конструкції технологічно ефективні тільки при відсутності дефектів (тріщин, нещільностей, щілин, покороблення), які дозволяють парі, конденсату або ґрунтовим водам проникати в огороження, зволожувати його, знижуючи, тим самим, теплозахисні властивості.

### **3.16.3. Ефективні системи паророзподілу**

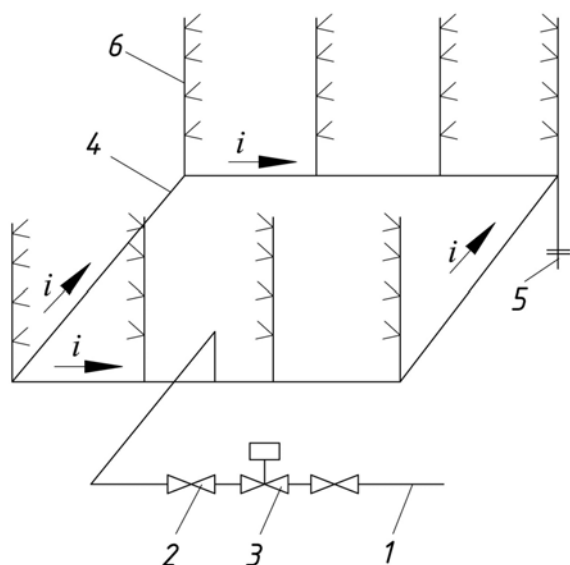
Одними із суттєвих недоліків існуючих теплових агрегатів є температурні перепади по висоті, що знижують однорідність фізико-механічних властивостей виробів після теплової обробки. В просторах між виробами в камерах, в технологічних порожнинах і в пустотах виробів утворюються області нерухомого середовища, так звані повітряні "мішки", що істотно знижує ефективність тепло- і масообміну. Для усунення цих недоліків передбачають заходи для підвищення інтенсивності і рівномірності теплообміну в установках за рахунок створення циркуляції теплоносія, руйнування повітряної і конденсатної плівки, які перешкоджають безперервному надходженню нових кількостей теплоносія до поверхні виробів.

Спрямована циркуляція середовища за рахунок струминної енергії пари, що подається, може бути отримана як в установках періодичної, так і неперервної дії.

Для **ямних камер** ефективною є *схема (див. рис. 3.25) організації циркуляції середовища за рахунок енергії швидкісного струменя пари, що виходить з циліндричних або розширюваних сопел (т.зв. сопла Ла-*



валя). Контур циркуляції організується в об'ємі установки при відповідному розміщенні сопел і напрямку осі струменя пари. В камерах глибиною понад 3,5 м сопла нижнього і верхнього колекторів розташовані у взаємно протилежних напрямках, створюючи замкнутий контур циркуляції; при цьому струмені пари не повинні бути спрямовані на поверхню виробу.



**Рис. 3.60.** Схема паророзподілу через вертикальні стояки

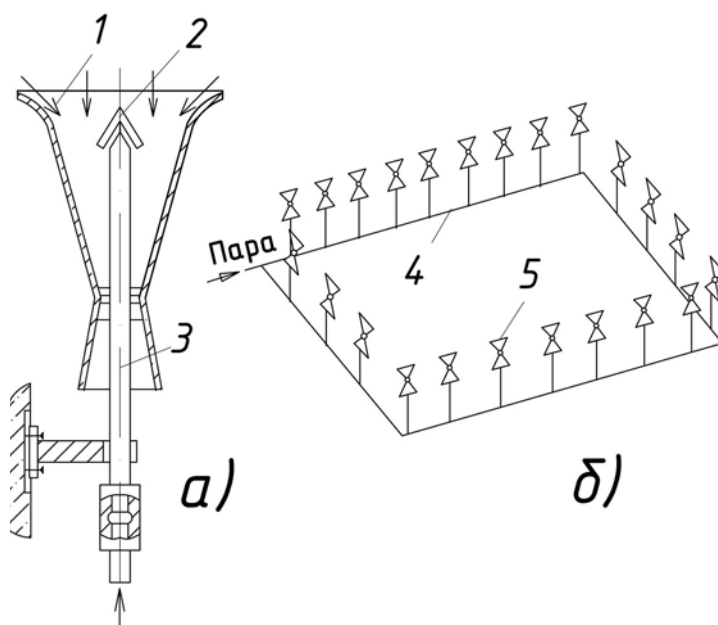
1 – магістральний паропровід; 2 – запірний вентиль; 3 – регулювальний клапан; 4 – колектор; 5 – відведення конденсату; 6 – перфорований стояк

В порівнянні з колекторами в попередній схемі) кількість стояків зі спрямованим розташуванням отворів створює інтенсивний рух теплоносія, але організований в горизонтальній площині. При цьому стояки можна поставити також в кутах камери, тобто там, де звичайно утворюється зона нерухомого середовища: це підвищує однорідність гріючого середовища і умови тепломасообміну.

Для інтенсифікації тепловіддачі шляхом підвищення швидкості руху теплоносія верти-

відному розміщенні сопел і напрямку осі струменя пари. В камерах глибиною понад 3,5 м сопла нижнього і верхнього колекторів розташовані у взаємно протилежних напрямках, створюючи замкнутий контур циркуляції; при цьому струмені пари не повинні бути спрямовані на поверхню виробу.

Паророзподіл з випуском теплоносія через вертикальні стояки. Спрямований рух теплоносія в камері можна організувати не тільки у вертикальній площині, як було показано раніше, але й в горизонтальній (рис. 3.60-3.61). Рівномірна подача пари по висоті камери через отвори в стояках забезпечує її рівномірний розподіл, а більша (в порівнянні з колекторами в попередній схемі) кількість стояків зі спря-



**Рис. 3.61.** Схема паророзподілу за допомогою насосів-кондиціонерів

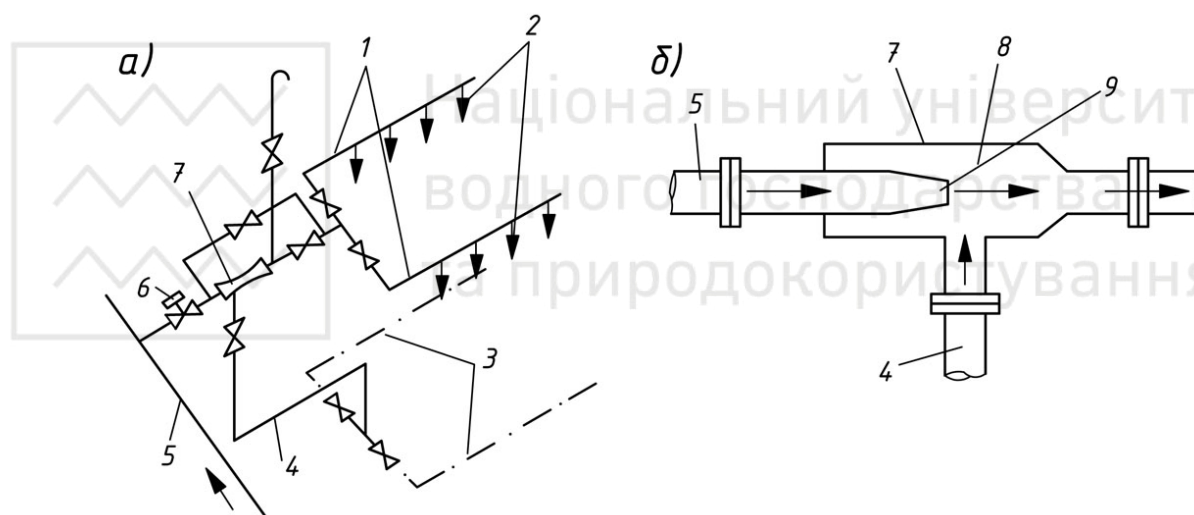
а – насос-кондиціонер; б – схема установки

1 – вхід у змішувач; 2 – відбивач; 3 – паровий стояк; 4 – колектор; 5 – насос-кондиціонер



кальні стояки можуть бути обладнані соплами або *насосами-кондиціонерами* (рис. 3.61). В результаті різниці тисків, що створюється на кінцях соплоподібного патрубка насоса-кондиціонера за рахунок різної швидкості надходження пари, відбувається підсмоктування пароповітряного середовища з камери і наступне перемішування з парю, що надходить.

*Схема раціонального паророзподілу з зовнішнім ежектором* (рис. 3.62). Принцип її роботи полягає в наступному. Пара з парової магістралі 5 подається через регулювальний клапан 6 в ежектор 7, а потім у верхні роздавальні колектори 1 із соплами 2, спрямованими вниз. В нижній частині камери ежектором створюється розрідження, що змушує пароповітряну суміш засмоктуватися в перфоровані трубопроводи 3. Тим самим в камері створюється необхідна циркуляція пароповітряної суміші.



**Рис. 3.62.** Схема паророзподілу із зовнішнім ежектором  
 а – схема паропроводів; б – схема ежектора

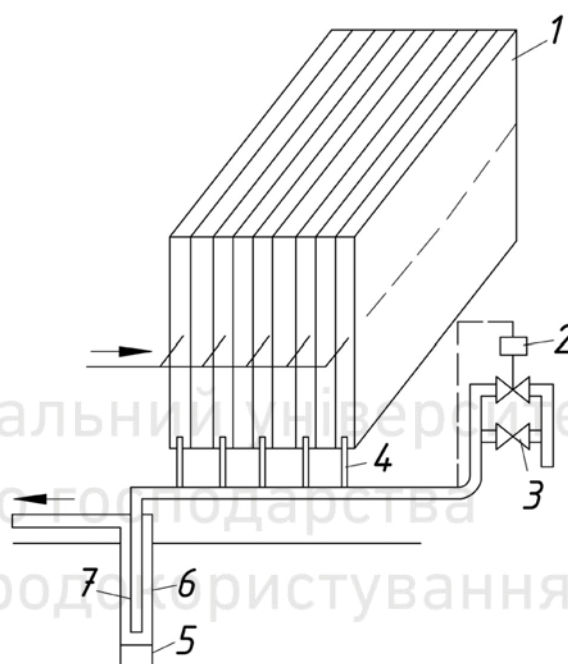
Відібрана пароповітряна суміш надходить в перфоровані трубопроводи 3 внизу камери через трубопровід 4, а потім в ежектор 7 і за рахунок тиску, створеного парю, що викидається через сопло 9, ежектуються в змішувальну камеру 8. В змішувальній камері свіжа пара змішується з пароповітряною сумішшю і надходить у колектори 1 для подачі в камеру через сопла 2.

Розглянута схема, як і попередні, дозволяє створити необхідну циркуляцію в камері і підвищити рівномірність обробки виробів.



При прогріві виробів в **касетних установках** між верхньою і нижньою частиною відсіків виникає температурний перепад до 10...15°C. Для рівномірного розподілу температури по висоті відсіків доцільно вводити пару на рівні 1/2 висоти відсіку за допомогою перфорованих труб, отвори яких спрямовані вниз; на отвори бажано встановити сопла.

При подачі пари у відсіки касетної установки температура в зовнішніх відсіках підвищується швидше, ніж у внутрішніх, тому що внутрішні теплові відсіки прогрівають виробу, розташовані з двох сторін і вимагають теплоти в два рази більше, ніж зовнішні. В результаті в зовнішніх теплових відсіках з'являється надлишковий тиск пари. Повітря, пароповітряна суміш і пара попадають в конденсатовідвідну гребінку, підвищують в ній тиск і створюють напір. В таких умовах відведення повітря з внутрішніх теплових відсіків ускладнений; зробити це можна тільки після поступового його нагрівання через 1.5...3 год. В результаті збільшується загальний час підігріву виробів в касетних установках. Для підвищення ефективності роботи агрегатів існує система роздільного відведення конденсату і повітря. В цьому випадку теплові відсіки підключаються до загального конденсато-повітряпроводу (рис. 3.63). В процесі теплової обробки конденсат і повітря з теплових відсіків надходять у гребінку конденсатовідвідника, до якої приєднаний стояк із запірним вентилям для відведення повітря. При відкритому вентилі повітря через стояк виходить назовні а конденсат через внутрішню трубу попадає в зовнішню і самопливом виводиться в загальний конденсатопровід. Надходження пари в конденсатовідвідник і поява в ньому надлишкового тиску в цьому



**Рис. 3.63.** Схема окремого відведення конденсату і повітря з теплових відсіків

1 – тепловий відсік касети; 2 – регулятор температури прямої дії; 3 – запірний вентиль; 4 – штуцери і гнучкі трубки подачі пари в теплові відсіки касети; 5 – бетонне дно; 6 – зовнішня труба; 7 – внутрішня труба

агрегатів існує система роздільного відведення конденсату і повітря. В цьому випадку теплові відсіки підключаються до загального конденсато-повітряпроводу (рис. 3.63). В процесі теплової обробки конденсат і повітря з теплових відсіків надходять у гребінку конденсатовідвідника, до якої приєднаний стояк із запірним вентилям для відведення повітря. При відкритому вентилі повітря через стояк виходить назовні а конденсат через внутрішню трубу попадає в зовнішню і самопливом виводиться в загальний конденсатопровід. Надходження пари в конденсатовідвідник і поява в ньому надлишкового тиску в цьому



випадку не відбувається, оскільки тиск пари в теплових відсіках врівноважується стовпом конденсату в зовнішній трубі. Довжина внутрішньої труби залежить від надлишкового тиску в теплових відсіках. При повному витисненні повітря з відсіків автоматично закривається вентиль за допомогою регулятора температури прямої дії, термобалон якого спрацьовує після заповнення гребінки парою.

Інша система видалення повітря з теплових відсіків передбачає перемикання ежектора (див. рис. 3.29). За цією схемою одночасно з подачею пари зверху ежектор відсмоктує повітря з нижньої частини відсіків через паровий колектор, відвідний трубопровід і повітрявідвідний патрубок в атмосферу. В цьому випадку виключається розрідження у відсіках, і вони швидко заповнюються чистою парою. Закінчення видалення повітря визначається по температурі в нижній частині відсіків: вона не повинна відрізнитися від температури насичення пари. Видалення повітря триває 10...20 хв., що значно скорочує час спеціальної продувки теплових відсіків. Після видалення повітря ежектор переключають на нормальний режим роботи.

Найкращі результати теплопостачання **термоформ** досягаються при використанні примусової циркуляції пари за допомогою ежекторної системи. В цьому випадку нерівномірність температури на поверхні виробів зменшується, а тривалість циклу теплової обробки скорочується.

Пару подають в порожнини форм з боку, протилежного випуску конденсату. Для розведення пари і прийому конденсату в основі паке-ту термоформ влаштовують відповідні стійки-колектори з гребінками, до яких через гумові шланги підключаються форми і кришка пакета з паровою порожниною.

#### **3.16.4. Геліотермальна обробка бетону**

Одним з можливих прийомів економії теплової енергії є створення технології прискореного твердіння залізобетонних виробів в полігонних умовах з використанням сонячної енергії. Сутність методу геліотермообробки полягає в тому, що виріб, який прогрівається у формі, виконує функції геліоприймача. При цьому власне твердіючий бетон є поглинаючим і акумулюючим елементом, металева форма – корпусом, а геліокришка – світлопрозорим покриттям геліоформи.

Спосіб теплової обробки виробів в геліоформах зі світлопрозорим теплоізолюючим покриттям (геліотермообробка із застосуванням по-



крить типу *Svitap*) найбільш ефективний при виготовленні бетонних і залізобетонних виробів суцільного перерізу товщиною 100...400 мм із важкого бетону класу В15 і вище.

На геліотермообробку збірного залізобетону із застосуванням покриття *Svitap* варто переходити при настанні жаркої сонячної погоди і температурі повітря не нижче  $+25^{\circ}\text{C}$ . Застосовуючи склади, що підвищують ступінь поглинання бетоном сонячної радіації, геліотермообробку виробів можна здійснювати при сонячній погоді і температурі повітря в денний час доби не нижче  $+20^{\circ}\text{C}$ . Використовуючи швидкотвердіючі цементи, відповідні хімічні добавки, попередньо розігріту бетонну суміш (в тому числі за рахунок застосування води замішування, підігріту сонячною радіацією) та інші технологічні заходи, що дозволяють інтенсифікувати твердіння бетону в геліоформах, перехід на геліотермообробку виробів можна робити в сонячну погоду при температурі повітря не нижче  $+15^{\circ}\text{C}$ .

Геліотермообробка із застосуванням покриття *Svitap* передбачає використання геліоформ, що складаються з двох основних елементів: власне металевої форми (звичайної форми, застосовуваної при виробництві збірного залізобетону) і геліокришки (покриття *Svitap*) зі спеціальним вкладишем, встановлюваної на форму таким чином, щоб між поверхнею щойно вкладеного бетону і нижньою поверхнею вкладиша створювався герметизований повітряний прошарок визначеного розміру.

При відсутності сонячної погоди в літню пору для підігріву виробів можна використовувати дублююче джерело енергії (пару, електроенергію) або збільшувати тривалість перебування виробів під покриттям, застосовуючи дифузійну сонячну радіацію.



## 4. ПРАКТИКУМ. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ\*

### Модуль 3. Процеси сушіння, випалу і плавлення матеріалів

**Приклад 1.** Визначити коефіцієнт тепловіддачі від димових газів до вільно висячих ланцюгів обертової печі, якщо середня швидкість газів становить  $w=9.46$  м/с, кінематична в'язкість газів  $\nu = 95 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Овальні ланцюги мають діаметр  $d = 25$ мм, теплопровідність газів  $\lambda = 0,069$  Вт/(мК).

Визначаємо критерії подібності:

$$Re = \frac{wd}{\nu} = \frac{9.46 \cdot 0.025}{95 \cdot 10^{-6}} = 2489,$$

$$Nu = 0.45 Re^{0.5} = 0.45 \cdot 2489^{0.5} = 22.45.$$

Тоді:

$$\alpha_r = Nu \frac{\lambda}{d} = 22.45 \cdot \frac{0.069}{0.025} = 62 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}).$$

**Приклад 2.** Визначити коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні стінки сушарки у навколишнє середовище, якщо відомо: середня температура гріючих газів 80°C (як середньоарифметична температура газів на вході і виході із сушарки); температура повітря  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ; визначальний розмір (висота сушарки) – 2,04м.

З табл.Д11 [10] визначаємо:

$$\lambda_{\text{пов}} = 0.0252 \text{ Вт}/(\text{мК});$$

$$\nu_{\text{пов}} = 15,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с};$$

$$Pr = 0.703.$$

Критерій Грасгофа:

$$Gr = \frac{g l^3 \Delta t}{\nu^2 \times T} = \frac{9.81 \cdot 2.04^3 (30 - 20)}{(15.7 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (273 + 20)} = 1.15 \times 10^{10}.$$

$$\text{Добуток } Gr \cdot Pr = 1.15 \cdot 10^{10} \cdot 0.703 = 0.81 \cdot 10^{10}.$$

Виходячи з того, що  $Gr \cdot Pr > 10^9$ , застосовуємо залежність

\* Приклади розв'язування інших видів задач наведені в навчальному посібнику [10].





$$Nu = 0.15(Gr \cdot Pr)^{0.33} = 0.15 \cdot (0.81 \cdot 10^{10})^{0.33} = 279.18.$$

Конвективна складова тепловіддачі:

$$\alpha^k = Nu \cdot \lambda / l = \frac{279.18 \cdot 0.0252}{2.04} = 3.45 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}.$$

Променева складова:

$$\begin{aligned} \alpha^{пр} &= E \cdot C_0 \left[ (T_{ст} / 100)^4 - (T_0 / 100)^4 \right] / (t_{ст} - t_0) = \\ &= 0.8 \cdot 5.67 \left[ (0.303 / 100)^4 \right] / (30 - 20) = 4,8 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}. \end{aligned}$$

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha = \alpha^к + \alpha^{пр} = 3,45 + 4,8 + 8,25 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}.$$

**Приклад 3.** Побудувати процес сушіння шлікеру у розпилювальній сушарці за наступними вихідними даними: температура теплоносія  $t_1 = 1200^\circ\text{C}$ , вологовміст  $d_1 = 84$  г на 1 кг сухих газів (рис. 4.1.). Температура відпрацьованого теплоносія –  $t_2 = 80^\circ\text{C}$ ; температура зовнішнього повітря  $t_0 = -10^\circ\text{C}$ ,  $\phi_0 = 60\%$ ,  $d_0 = 5$  г/кг сухого повітря. Теплові втрати складають 260 кДж/кг вологи.

На I-d- діаграмі наносимо точку В, яка відповідає  $t_1 = 1200^\circ\text{C}$  і  $d_1 = 84$  г/кг сухих газів. Із точки В проводимо вниз адіабатний промінь та промінь, паралельний лініям сталого вологовмісту.

На адіабатному промені позначаємо довільно точку  $e$ , з неї опустимо перпендикуляр на промінь, паралельний лініям  $d = \text{const}$  до точки  $f$ . Із т.  $e$  проводимо промінь, паралельний  $d = \text{const}$  і на ньому знайдемо положення т. Е за підрахунком:

$$eE = \frac{\Delta ef}{m}, \text{ мм,}$$

де  $\Delta$  – теплові втрати дійсного процесу сушіння ( $\Delta = 260$  кДж/ кг вол.).

$m$  – приведений масштаб I-d діаграми ( $m = \frac{M_i}{M_d} \cdot 1000$ , де  $M_i$ ,  $M_d$  – масштаби по ентальпії і вологовмісту).

Із т. А проводимо вертикальний промінь до перетину з ізотермою  $t_1 = 1200^\circ\text{C}$  (точка В'). Довжина відрізка АВ' складає 607 мм. Питомі витрати теплоти визначимо за формулою

$$q = \frac{AB'}{CD} \cdot m = \frac{607}{462} \cdot 2100 = 2763 \text{ кДж.}$$





$$\tau_c = \left( \frac{W_{\text{поч}} - W_{\text{кр}}}{N} + \frac{2.3}{K} \lg \frac{W_{\text{кр}}}{W_{\text{кін}}} \right) K_n \times K_y \text{ (хв)},$$

де  $K_n$  – коефіцієнт, що залежить від породи деревини ( $K_n = 0.9 \dots 1$ );  
 $K_y$  – коефіцієнт, що враховує напрям циркуляції повітря в сушарці  
( $K_y = 1 \dots 1.5$ );  $N$  – коефіцієнт швидкості сушіння в першому періоді  
при поперечній циркуляції повітря:

$$N = \frac{t^{1.55} \cdot V^{0.4}}{150 \cdot S^{1.3}};$$

$K$  – коефіцієнт швидкості сушіння в другому періоді:

$$K = \frac{t^{1.75} \cdot V^{0.3}}{10700 \cdot S^{1.3}}.$$

Після підстановки значень параметрів отримаємо:



$$N = \frac{190^{1.55} \cdot 2.5^{0.4}}{150 \cdot 1.5^{1.3}} = 19.3;$$

$$K = \frac{190^{1.75} \cdot 2.5^{0.3}}{10700 \cdot 1.5^{1.3}} = 0.71.$$

$$\text{Тоді } \tau_c = \left( \frac{80 - 30}{19.3} + \frac{2.3}{0.71} \lg \frac{30}{6} \right) \cdot 0.95 \cdot 1.5 = 6.84 \approx 7 \text{ хв.}$$

**Приклад 5.** Визначити щільність теплового потоку при випалі вапна у киплячому шарі а також робочий об'єм і лінійні розміри камери випалу. Розмір частинок матеріалу  $d_e = 5$  мм, густина  $2750$   $\text{кг/м}^3$ , початкова температура  $1000$  К і кінцева  $1270$  К. Температура гріючих газів:  $1800$ К – початкова;  $1370$  К – кінцева, середнє значення теплопровідності –  $100 \times 10^{-3}$  Вт/(м·К), кінематична в'язкість  $200 \times 10^{-6}$   $\text{м}^2/\text{с}$ , густина  $0,25$   $\text{кг/м}^3$ . Продуктивність установки по вапну  $300$  т на добу ( $3,48$   $\text{кг/с}$ ). На  $1$ кг вапна передається  $2250$  кДж тепла, питома витрата гріючих газів  $2,5$   $\text{м}^3$  на  $1$ кг вапна; пористість шару матеріалу в стабільному стані –  $45\%$ .

Розраховуємо визначальні критерії:

– Федорова:



$$Fe = d_e \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{3} \times \frac{g}{v^2} \times \frac{\rho_m - \rho_0}{\rho_v}} =$$
$$= 0,005 \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{3} \times \frac{9,81}{(200 \times 10^{-6})^2} \times \frac{27500 - 2,5}{2,5}} = 76,5.$$

– Рейнольдса:

$$Re_{кш} = 0,2Fe\sqrt{Fe} = 0,2 \times 76,5\sqrt{76,5} = 134 \text{ (перехідний режим);}$$

$$\omega^0 = \frac{134 \times 200 \times 10^{-6}}{0,005} = 5,35 \text{ м/с;}$$

Логарифмічно-усереднені температури газів і матеріалу:

$$T_{\Gamma} = \frac{1800 - 1370}{\ln \frac{1800}{1370}} = 1590 \text{ К; } T_M = \frac{1270 - 1000}{\ln \frac{1270}{1000}} = 1125 \text{ К;}$$

$$\Delta t = 1590 - 1,1 \times 1125 = 355 \text{ К.}$$

Щільність теплового потоку відносно одиниці об'єму:

$$q_{кш}^k = 0,0039 \frac{100 \times 10^{-3}}{0,005^2} \times 13,4^{1,25} (1 - 0,45) \times 355 \times 10^{-3} = 1410 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3}.$$

Робочий об'єм, який займає киплячий шар:

$$V_{кш} = \frac{3,48 \times 2250}{1410} = 5,55 \text{ м}^3$$

$$\text{Площа решітки } S = \frac{3,48 \times 9,5}{5,35} \times \frac{1590}{278} = 9,5 \text{ м}^2.$$

$$\text{Товщина шару вапняку } h = \frac{5,55}{9,5} = 0,585 \text{ м.}$$

**Приклад 6.** Визначити щільність теплового потоку при випалі вапна у фонтануючому шарі, а також робочий об'єм і розміри камери. Продуктивність установки, фізичні характеристики матеріалу і гріючих газів, глибину термообробки прийняти такими ж, як і в попередньому прикладі.

Критерій Рейнольда для фонтануючого шару:

$$Re_{\phi} = 1,44Fe\sqrt{Fe} = 1,44 \times 76,5\sqrt{76,5} = 965.$$

Швидкість газів у вузькому розрізі конуса:



$$\omega_{\phi} \frac{965 \times 200 \times 10^{-6}}{0,005} = 38,5 \text{ м/с.}$$

Щільність теплового потоку відносно одиниці об'єму фонтануючого шару складає:

$$q_{\phi}^k = 0,0006 \frac{\lambda}{d_e^2} \text{Re}_{\phi}^{1,25} (1 - \phi) \Delta t \times 10^{-3} = 0,0006 \frac{100 \times 10^{-3}}{(0,005)^2} 965^{1,25} \times \\ \times (1 - 0,45) 355 \times 10^{-3} = 2520 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3}.$$

Робочий об'єм фонтануючого шару:

$$V_{\phi} = \frac{3,48 \times 2250}{2520} = 3,1 \text{ м}^3.$$

Площа і діаметр вузького перерізу конуса:



$$S = \frac{3,48 \times 2,5}{38,5} \times \frac{1800}{273} = 1,49 \text{ м}^2;$$

$$d = \sqrt{\frac{4}{3,14}} \times 1,49 = 1,375 \text{ м.}$$

**Приклад 7.** Визначити основні розміри тунельної печі для випалу каналізаційних труб при річній продуктивності  $G_{\text{річ}} = 15000$  т/год. Щільність садки прийнята  $g = 0,3$  т/м<sup>3</sup>; процент браку  $p = 4\%$ ; тривалість циклу  $\tau_{\text{ц}} = 46$  год. Річний фонд роботи часу  $P_{\text{річ}} = 8760$  год.

Ємність печі:

$$G_{\text{п}} = \frac{G_{\text{річ}} (1 + 0,01p) \cdot \tau_{\text{ц}}}{P_{\text{річ}}} = \frac{15000 \cdot (1 + 0,04) \cdot 46}{8760} = 81 \text{ т.}$$

Робочий об'єм печі:

$$V = \frac{G_{\text{п}}}{g} = \frac{81}{0,3} = 270 \text{ м}^3.$$

Якщо вибрати ширину  $B = 1,9$  м, висоту  $H = 1,6$  м, переріз  $f = 3$  м<sup>2</sup>, то довжина робочої частини печі  $L = 270/3 = 90$  м.

При довжині однієї вагонетки  $l_{\text{ваг}} = 2$  м, кількість їх в печі складе 45 шт.





Вихід вагонеток  $45:46 = 0,98$  шт/год. При співвідношенні довжин зон (в %) 37:18:45, кількість вагонеток в зоні нагріву 17, в зоні випалу 8, в зоні охолодження 20 шт.

## Модуль 4. Тепловологісна обробка виробів з бетону і залізобетону

**Приклад 8.** Призначити режим теплової обробки каменів бортових розміром  $1000 \times 150 \times 300$  см із важкого бетону класу В25, жорсткість суміші 10 с. Початкова міцність бетону 0,3 МПа. ТО передбачається проводити гострою парою у вертикальній камері.

Відповідно до норм проектування режимів ТО (див. п. 7.3.1) призначаємо температуру ізотермічного прогріву  $t_{із} = 85^\circ\text{C}$ . Враховуючи використання жорсткої суміші та високий проектний клас бетону, проведення попередньої витримки не передбачаємо ( $\tau_{п.в.} = 0$ ).

Використовуючи рекомендовані режими ТО (табл. 7.2) для виробів із важкого бетону при товщині виробу  $< 160$  мм і проектному класі бетону В25 такий попередній режим: 3 + 4 + 2 год.

При початковій міцності бетону 0,3 МПа швидкість нагріву рекомендується  $20^\circ\text{C}/\text{год}$  (табл. 3.3). В той же час, при товщині виробу від 100 до 250 мм швидкість нагріву приймається  $25^\circ\text{C}/\text{год}$  (табл. 7.1).

Таким чином, остаточно приймаємо швидкість нагріву  $\Delta t / \Delta \tau_1 = 25^\circ\text{C}/\text{год}$ .

Приймаємо початкову температуру бетону  $20^\circ\text{C}$ .

Визначаємо тривалість періоду нагрівання:

$$\tau_1 = \frac{85 - 20}{20} = 3,25.$$

Приймаємо  $\tau_1 = 3,5$  год.

Приймаємо температуру навколишнього середовища  $15^\circ\text{C}$ , а температуру бетону на виході з камери  $30^\circ\text{C}$ .

Швидкість охолодження в цьому випадку становитиме:

$$\Delta t / \Delta \tau = \frac{85 - 30}{2} = 27^\circ\text{C}/\text{год}, \text{ що задовольняє вимогам граничної}$$

швидкості охолодження.

Враховуючи конструктивну особливість вертикальних камер, остаточно приймаємо тривалість охолодження рівною тривалості нагріву:



$$\tau_{II} = \tau_I = 3,5 \text{ год.}$$

Отже, загальний режим теплової обробки матиме такий вигляд:

$$\tau_{т.о.} = \tau_I + \tau_{II} + \tau_{III} = 3,5 + 4 + 3,5 = 11 \text{ год.}$$

**Приклад 9.** Призначити режим тепловологісної обробки плити перекриття товщиною 20 см із керамзитобетону класу В7,5, жорсткість суміші 15 с. Обробку передбачається проводити "гострою" парою в ямній камері.

Оскільки керамзитобетон класу В7,5 відноситься до конструктивно-теплоізоляційного легкого бетону, то відповідно до норм проектування режимів ТО (див. п. 7.3.1) призначаємо температуру ізотермічного прогріву  $t_{із} = 90^\circ\text{C}$ . Тривалість ізотермічного прогріву пропарюванні гострою парою і товщині виробу 200 мм –  $\tau_{із} = 4$  год. (табл. 7.7). При пропарюванні в камерах швидкість нагріву приймаємо  $30^\circ\text{C}/\text{год}$  (табл. 7.6).

Приймаємо початкову температуру бетону  $20^\circ\text{C}$ .

Тоді період нагрівання (підвищення температури) становитиме:

$$\tau_I = \frac{90 - 20}{30} = 2,33 \text{ год. Приймаємо } \tau_I = 2,5 \text{ год.}$$

Приймаємо температуру навколишнього середовища  $15^\circ\text{C}$ , а температуру бетону на виході з камери  $30^\circ\text{C}$ .

Тоді тривалість охолодження можна прийняти  $\tau_{III} = 1,5$  год.

Швидкість охолодження в цьому випадку становитиме:

$$\Delta t / \Delta \tau = \frac{90 - 30}{1,5} = 40^\circ\text{C} / \text{год}, \text{ що задовольняє вимогам граничної}$$

швидкості охолодження.

Тривалість попереднього витримування призначаємо за табл. 7.5 у відповідності із заданою жорсткістю суміші (15 с):  $\tau_{п.в.} = 1$  год.

Таким чином, загальний режим тепловологісної обробки має такий вигляд:  $\tau_{т.о.} = \tau_{п.в.} + \tau_I + \tau_{II} + \tau_{III} = 1 + 2,5 + 4 + 1,5 = 9$  год.

Оскільки тепла обробка проводиться "гострою" парою, то, для забезпечення необхідної відпускнуї вологості 13%, необхідно передбачити в період охолодження вентиляцію камери теплової обробки.

**Приклад 10.** Розрахувати конструктивно-технологічні параметри тунельної камери для теплової обробки керамзитобетонних стінових панелей  $3300 \times 2600 \times 300$  мм. Середній об'єм виробу  $2,3 \text{ м}^3$ . Роз-



рахункова годинна продуктивність  $\Pi_{\text{год}} = 6$  вир./год. Розрахунковий режим теплової обробки:  $2+7+2 = 11$  год. За умовами виробництва довжина робочої частини камери не повинна перевищувати 120 м.

Кількість виробів, які повинні одночасно знаходитись в камері:

$$N_{\text{в}} = \Pi_{\text{год}} \cdot \tau_{\text{т.о}} = 6 \cdot 11 = 66 \text{ шт.}$$

Початково приймаємо одноярусну камеру. Тоді, при довжині форми-вагонетки  $l_{\text{ф}} = 3,3+0,1$  (0,1 м – зазор по довжині між окремими формами-вагонетками) і кількості ярусів  $n_{\text{я}} = 1$ , робоча довжина камери складе:

$$L = \frac{N_{\text{в}}}{n_{\text{я}}} (l_{\text{ф}} + l_1) = \frac{66}{1} (3,4 + 0,1) = 231 \text{ м.}$$

Але, оскільки довжина камери обмежена завданням ( $<120$  м), то приймаємо камеру з двома ярусами:  $n_{\text{я}} = 2$ .

Тоді  $L = \frac{66}{2} (3,4 + 0,1) = 115,5$  м, що відповідає заданому обмеженню.

Висота камери:

$$H = n_{\text{я}} \cdot (h_{\text{ф}} + a) - a + h_1 + h_2,$$

де  $h_{\text{ф}}$  – висота форми-вагонетки (приймається рівною висоті виробу  $+0,2 \dots 0,25$  м);  $a$  – вільний проміжок між формами по висоті ( $0,1 \dots 0,2$  м);  $h_1$  – відстань від підлоги камери до дна форми-вагонетки ( $0,12 \dots 0,25$  м);  $h_2$  – відстань від верхньої площини виробів до перекриття камери ( $0,1 \dots 0,2$  м).

$$H = 2 \cdot (0,55 + 0,1) - 0,1 + 0,15 + 0,2 = 1,55 \text{ м.}$$

Ширина камери при влаштуванні технологічного проходу (див. п. 3.13.1 і п. 7.3.2) посередині:

$$B = b_{\text{ф}} + 2 \cdot b_1,$$

де  $b_{\text{ф}}$  – ширина форми-вагонетки (приймається рівною ширині виробу  $+0,05 \dots 0,1$  м);  $b_1$  – допустимий зазор між стінками камери і формою-вагонеткою ( $0,35 \dots 0,4$  м).

$$B = b_{\text{ф}} + 2 \cdot b_1 = 2,7 + 2 \cdot 0,35 = 3,4 \text{ м.}$$

Довжини зон в камері:

$$\text{– підігріву і охолодження : } L_1 = L_3 = 115,5 \cdot \frac{2}{11} = 21 \text{ м;}$$

$$\text{– ізотермічної витримки : } L_2 = 115,5 \cdot \frac{7}{11} = 73,5 \text{ м.}$$

Тоді камера забезпечить річну продуктивність лінії при ритмі конвеєра одного ярусу камери:



$$r_{т.о.} = \frac{\tau_{т.о.}}{n_{\phi}} = \frac{11}{33} = 0.33 \text{ год.} = 20 \text{ хв.}$$

При ритмі конвеєра формування  $r_{\phi.} = \frac{60}{6} = 10$  хв. забезпечується

робота двох ярусів тунельної камери із заданою продуктивністю 6 виробів за годину.

**Приклад 11.** Стіни пропарювальної камери виконані з двох залізобетонних плит товщиною  $\delta_1 = \delta_2 = 14$  см з повітряним прошарком між ними  $\delta_3 = 5$  см. Визначити загальний термічний опір стінки.

З довідкових даних знаходимо коефіцієнти теплопровідності для залізобетону і повітря:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 1,56 \text{ Вт/(м} \cdot \text{C)}; \lambda_3 = 0,024 \text{ Вт/(м} \cdot \text{C)}.$$

Загальний термічний опір стінки:

$$R = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \frac{0,14}{1,56} + \frac{0,14}{1,56} + \frac{0,05}{0,024} = 2,26 \text{ (м}^2 \cdot \text{C)} / \text{Вт}.$$

**Приклад 12.** Розрахувати кількість акумульованого тепла через  $1 \text{ м}^2$  стін пропарювальних камер, якщо прогрівання ведеться 3 год. при середній температурі поверхні стінки  $t_{п} = 80^\circ\text{C}$  від початкової  $t_{пoch} = 80^\circ\text{C}$ . Стіни виконані із залізобетону, шлакобетону та керамічної цегли. Теплофізичні характеристики стін із залізобетону, шлакобетону та керамічної цегли відповідно: коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  – 1,55; 0,53; 0,82 Вт/м $\cdot$ °C; коефіцієнт теплоємності  $c$  – 1,25; 0,75; 0,88 кДж/кг $\cdot$ °C; середня густина  $\rho$  – 2400; 1200; 1800 кг/м $^3$ ; коефіцієнт температуропровідності  $a$  – 0,0018; 0,0021; 0,0019 м $^2$ /год.

Тепло, акумульоване огороженням теплових установок може бути визначене за формулою:

$$Q = 7,2 \cdot \lambda \cdot (t_{пoch} - t_{п}) \sqrt{\frac{\tau_1}{a \cdot \pi}}, \text{ кДж/м}^2.$$

Для залізобетону:

$$Q = 7,2 \cdot 1,55 \cdot 60 \sqrt{\frac{3}{0,0018 \cdot 3,14}} = 15500 \text{ кДж/м}^2 \text{ (100\%)}.$$

Для шлакобетону:



$$Q = 7,2 \cdot 0,53 \cdot 60 \sqrt{\frac{3}{0,0021 \cdot 3,14}} = 4850 \text{ кДж/м}^2 \text{ (31\%).}$$

Для цегли:

$$Q = 7,2 \cdot 0,82 \cdot 60 \sqrt{\frac{3}{0,0019 \cdot 3,14}} = 7850 \text{ кДж/м}^2 \text{ (51\%).}$$

З отриманих значень можна зробити висновок – для зниження теплових втрат на акумуляцію тепла огороженнями при розігріванні камер в якості матеріалів для них необхідно використовувати легкі матеріали з малими значеннями  $\lambda$ , але добре захищені від проникнення вологи.

**Приклад 13.** Максимальний перепад температур між парою в автоклаві і навколишнім середовищем  $\Delta t = 200^\circ\text{C}$ , максимально допустимі теплові втрати в навколишнє середовище при цій температурі з  $1\text{ м}^2$   $q = 177 \text{ Вт/м}^2$ , або коефіцієнт теплопередачі  $k = 177:200 = 0,89 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . Знайти мінімальну товщину теплоізоляції  $\delta$ . Прийняти коефіцієнти тепловіддачі на внутрішній і зовнішній поверхнях автоклаву  $\alpha_1 = 10000$ ;  $\alpha_2 = 12 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ; коефіцієнт теплопровідності огороження  $\lambda = 0,09 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$ .

Виходячи із виразу коефіцієнту теплопередачі

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

можна записати

$$k = 0,89 = \frac{1}{\frac{1}{10000} + \frac{\delta}{0,09} + \frac{1}{12}}. \text{ Звідки } \delta = 0,095 \text{ м.}$$

**Приклад 14.** Тепловиділення 1 кг цементу складає 265 кДж. Знайти підвищення температури бетону, що твердіє в повністю герметичній і теплоізолюваній камері, за рахунок екзотермії, якщо  $c = 1,2 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$ ;  $\rho = 2300 \text{ кг/м}^3$ ; витрата цементу  $\text{Ц} = 280 \text{ кг/м}^3$ .

Екзотермія  $1 \text{ м}^3$  бетону:  $q_{\text{екз}} = 265 \cdot 280 = 74000 \text{ кДж/м}^3$ .

Підвищення його температури за рахунок реакцій твердіння при відсутності тепловтрат:





$$\Delta t = \frac{q_{\text{екз}}}{\rho \cdot c} = \frac{74000}{2300 \cdot 1,2} = 27^{\circ}\text{C}.$$

Якщо з бетону випарується вода в кількості 1% від його маси через негерметичність форм, то температура бетону знизиться на

$$\Delta t = \frac{0,01 \cdot \rho \cdot r}{\rho \cdot c} = \frac{0,01 \cdot 2300 \cdot 2500}{2300 \cdot 1,2} = 20,8^{\circ}\text{C},$$

де  $r$  – питома теплота пароутворення, кДж/кг.

Тобто зниження температури складає приблизно  $20^{\circ}\text{C}$  на кожен 1% втрати маси бетону від випаровування вологи.

Якщо виріб твердіє в погано ізольованій формі, то тепло екзотермії втрачається в навколишнє середовище. Наприклад при коефіцієнті тепловіддачі  $a = 17,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ , модулю поверхні 20 і різниці температур між поверхнею і навколишнім середовищем  $50^{\circ}\text{C}$  годинне зниження температури складе

$$\Delta t = \frac{3,6 \cdot 17,5 \cdot 20 \cdot 50}{2300 \cdot 1,2} = 23^{\circ}\text{C}.$$

**Приклад 15.** Визначити питому величину тепловиділення з/б плити товщиною 20 см на ПЦ М400, якщо відомо:

- витрати цементу на 1 м<sup>3</sup> бет. – Ц = 400 кг;
- В/Ц = 0,5; початкова температура бетону:  $t_0 = 15^{\circ}\text{C}$ ;
- швидкість піднімання температури:  $b = 25^{\circ}/\text{год}$ ;
- тривалість нагріву:  $\tau_{\text{н}} = 3 \text{ год}$ ;
- температура ізотермічної витримки  $t_{\text{із}} = 90^{\circ}\text{C}$ ;
- тривалість ізотермічної витримки:  $\tau_{\text{із}} = 5 \text{ год}$ ;
- середній за період нагріву коефіцієнт теплообміну  $\alpha_{\text{н}} = 60 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;
- середній за період ізотермічної витримки коефіцієнт теплообміну  $\alpha_{\text{із}} = 80 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;
- коефіцієнт теплопровідності свіжовідформованого бетону:  $\lambda = 2,0 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$ ;
- середня густина свіжовідформованої плити:  $\rho = 2400 \text{ кг/м}^3$ .
- питома теплоємність бетону:  $c = 0,84 \text{ кДж/(кг} \cdot ^{\circ}\text{C)}$ .

Визначаємо коефіцієнт температуропроводності:

$$a = \frac{3,6 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} = \frac{3,6 \cdot 2}{0,84 \cdot 2400} = 0,00357 \text{ м}^2 / \text{год}.$$



Розраховуємо критерій Біо та Фур'є для періоду нагріву:

$$Bi = \frac{\alpha_n \cdot R}{\lambda} = \frac{60 \cdot 0,1}{2} = 3,0;$$

$$Fo = \frac{a \cdot \tau_n}{R^2} = \frac{0,00357 \cdot 3}{0,1^2} = 1,07.$$

За графіком  $C_2 = f_2(B_i; F_0)$  (див. рис. 2б [13]) знаходимо коефіцієнт  $C_2 = 0,17$ .

Знаходимо кількість градусо-годин, які набере бетон за період нагріву:

$$\theta_n = \left( t_0 + \frac{b \cdot R^2}{a} \cdot C_2 \right) \cdot \tau_n = \left( 15 + \frac{25 \cdot 0,1^2}{0,00357} \cdot 0,17 \right) \cdot 3 = 80,7^\circ \text{C} \cdot \text{год}$$

Для визначення середньої температури виробу в кінці періоду нагріву визначаємо новий критерій Біо з врахуванням значення  $\alpha_{iz}$ :

$$Bi = \frac{\alpha_{iz} \cdot R}{\lambda} = \frac{80 \cdot 0,1}{2} = 4,0.$$

Тоді, знаючи, що  $Bi = 4,0$  а  $Fo = 1,07$  за графіком функції  $C_1 = f_1(B_i; F_0)$  (див. рис. 2а [13]) знаходимо коефіцієнт  $C_1 = 0,55$ .

Тоді середня температура бетону в кінці періоду нагріву:

$$t_{\text{ср.к.}} = t_0 + \frac{b \cdot R^2}{a} \cdot C_1 = 15 + \frac{25 \cdot 0,1^2}{0,00357} \cdot 0,55 = 53,5^\circ \text{C}.$$

Визначаємо критерій Фур'є для ізотермічного режиму:

$$Fo = \frac{a \cdot \tau_{iz}}{R^2} = \frac{0,00357 \cdot 5}{0,1^2} = 1,79.$$

Знаючи значення критеріїв Біо та Фур'є для ізотермічного режиму ( $Fo = 1,79$ ;  $Bi = 4,0$ ) за графіком функції  $C_3 = f_3(B_i; F_0)$  (див. рис. 2в [13]) знаходимо коефіцієнт  $C_3 = 0,62$ .

Визначаємо кількість градусо-годин для періоду ізотермічної витримки:

$$\begin{aligned} \theta_{iz} &= t_{iz} \cdot \tau_{iz} - (t_{iz} - t_{\text{ср}}) \frac{R^2}{a} \cdot C_3 = \\ &= 90 \cdot 5 - (90 - 53,5) \cdot \frac{0,1^2}{0,00357} \cdot 0,62 = 387^\circ \text{C} \cdot \text{год} \end{aligned}$$



Загальна кількість градусо-годин набраних бетоном за період теплової обробки:

$$\theta = \theta_n + \theta_{is} = 80,7 + 387 = 467,7^\circ \text{C} \cdot \text{год}.$$

За номограмою (див. рис. 3.17) знаходимо, що даній кількості градусо-годин при  $\frac{V}{\text{Ц}} = 0,5$  і марці цементу М400 відповідає тепловиділення  $Q_E = 240 \frac{\text{кДж}}{\text{кг цементу}}$ . Тоді питоме тепловиділення бетону буде рівне:

$$Q_{E.\text{бет}} = Q_E \cdot \text{Ц} = 240 \cdot 400 = 96000 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \text{бетону}}.$$

**Приклад 16.** По трубопроводу діаметром 40 мм здійснюється подача пари у теплову установку із годинним споживанням 350 кг. Середня температури  $170^\circ\text{C}$ . Подача пари регулюється запірним вентилям. Визначити місцеві втрати тиску на вентилялі  $\zeta = 0,85$ .

З довідкових даних [13] знаходимо, що при температурі  $170^\circ\text{C}$  густина пари складає  $4,3 \text{ кг/м}^3$ .

Тоді можна знайти швидкість руху пари з виразу:

$$d = \sqrt{\frac{4G_n}{3600 \cdot v \cdot \rho \cdot \pi}},$$

де  $d$  – діаметр трубопроводу, м;  $G_n$  – витрата при на розрахунковій ділянці, кг/год;  $\rho$  – середня густина пари при відповідній температурі.

$$\text{Отже } v = \frac{4G_n}{3600 \cdot d^2 \cdot \rho \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 350}{3600 \cdot 0,04^2 \cdot 4,3 \cdot 3,14} = 18 \text{ м/с}.$$

$$\text{Тоді } \Delta P_M = \frac{\zeta \cdot v^2 \cdot \rho}{2} = \frac{0,85 \cdot 18^2 \cdot 4,3}{2} = 592 \text{ Па}.$$



## 5. ЗАВДАННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ\*

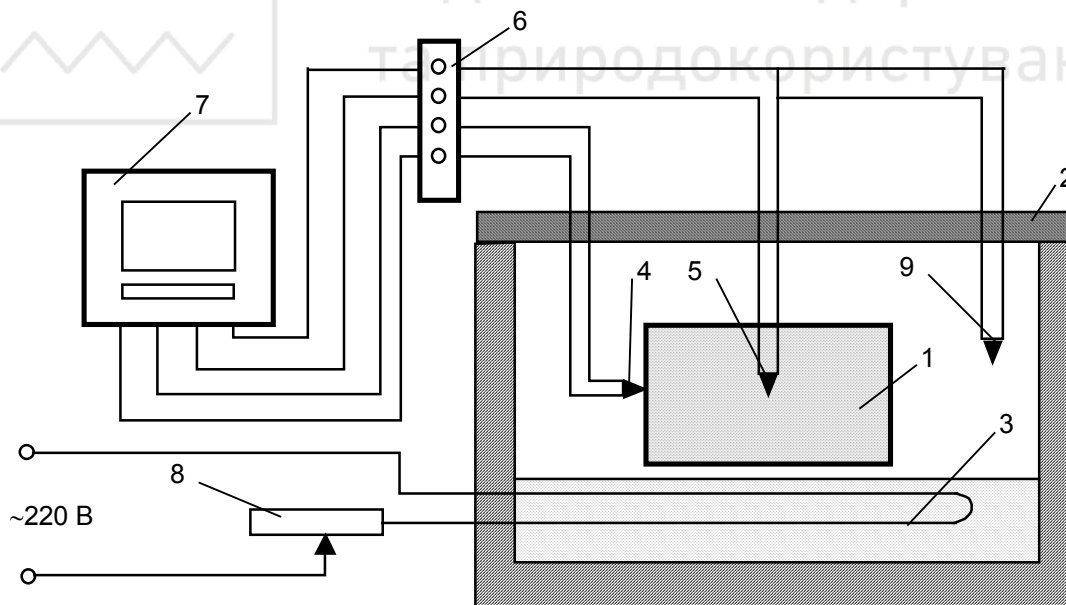
### 5.1. ТЕПЛОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВОЛОГІСНОЇ ОБРОБКИ БЕТОНУ

**Завдання:** Експериментально визначити теплофізичні характеристики процесу тепловологісної обробки бетону (коефіцієнти температуропровідності і теплопровідності).

**Обладнання і матеріали:** зразок бетону, камера теплової обробки, термопари, реєструючий прилад, ваги.

**Опис дослідної установки.**

Зразок у вигляді "нескінченої" пластини з вміщеними мідь-константановими термопарами 4 і 5 встановлений в лабораторній пропарювальній камері (рис. 5.1). Термопара 4 поміщена в центр зразка, а термопара 5 розміщена на поверхні виробу. Температура середо-



**Рис. 5.1.** Схема дослідної установки

1 – дослідний зразок; 2 – лабораторна пропарювальна камера; 3 – нагрівальний елемент; 4, 5, 9 – термопари; 6 – термостат холодних спаїв; 7 – прилад для вимірювання та реєстрації температури; 8 – реостат

\* Наведені окремі види робіт. Повністю завдання та рекомендації до виконання лабораторних робіт наведені в [14].



вища в камері контролюється терморпарою 9. Для створення теплового потоку використовується нагрівальний елемент 3 з можливістю регулювання реостатом 8.

### Порядок виконання роботи.

1. Підготовлений зразок з рівномірною швидкістю нагрівають в лабораторній установці до заданої температури (80...90°C). Швидкість нагріву рекомендується витримувати близько 1°C/хв.

2. В процесі нагріву через проміжки часу (2...5 хв.) знімають значення температури середовища  $t_c$ , на поверхні  $t_n$  і в центрі виробу  $t_{ц}$  за допомогою потенціометра або іншого реєструючого приладу та записують в табл.5.1.

Таблиця 5.1

Дослідні дані

$\tau$ , хв.	0	5	10	15	20	25	30	...
$t_c$ , °C								
$t_n$ , °C								
$t_{ц}$ , °C								

### Обробка результатів.

1. За отриманими значеннями табл. 5.1 в системі координат  $t = f(\tau)$ , будуються криві залежностей  $t_c = f(\tau)$ ;  $t_n = f(\tau)$ ;  $t_{ц} = f(\tau)$ .

2. Графічне поле залежностей розбивається на ділянки таким чином, щоб лінія  $t_n = f(\tau)$  була близькою до прямої лінії, а температурний інтервал  $t_{n2} - t_{n0}$  не перевищував 15...25 °C. На ділянках де зміна температури  $\theta = t_n - t_{ц}$  відбувається різко, температурний інтервал ділянки скорочують.

Графічні залежності будують за прикладом, зображеним на рис. 5.2.

3. Для кожної ділянки визначаються (всі показники знімають з побудованих кривих):

1) швидкість зміни температури поверхні або швидкість нагріву, °C/хв.:

$$\text{для ділянок I і II: } b_I = \frac{t_{n1} - t_{n0}}{\Delta\tau_1}; b_{II} = \frac{t_{n2} - t_{n1}}{\Delta\tau_2} \text{ і т.д.,}$$

де  $t_{n0}$ ,  $t_{n1}$  – температура поверхні на початку і в кінці ділянки, °C;

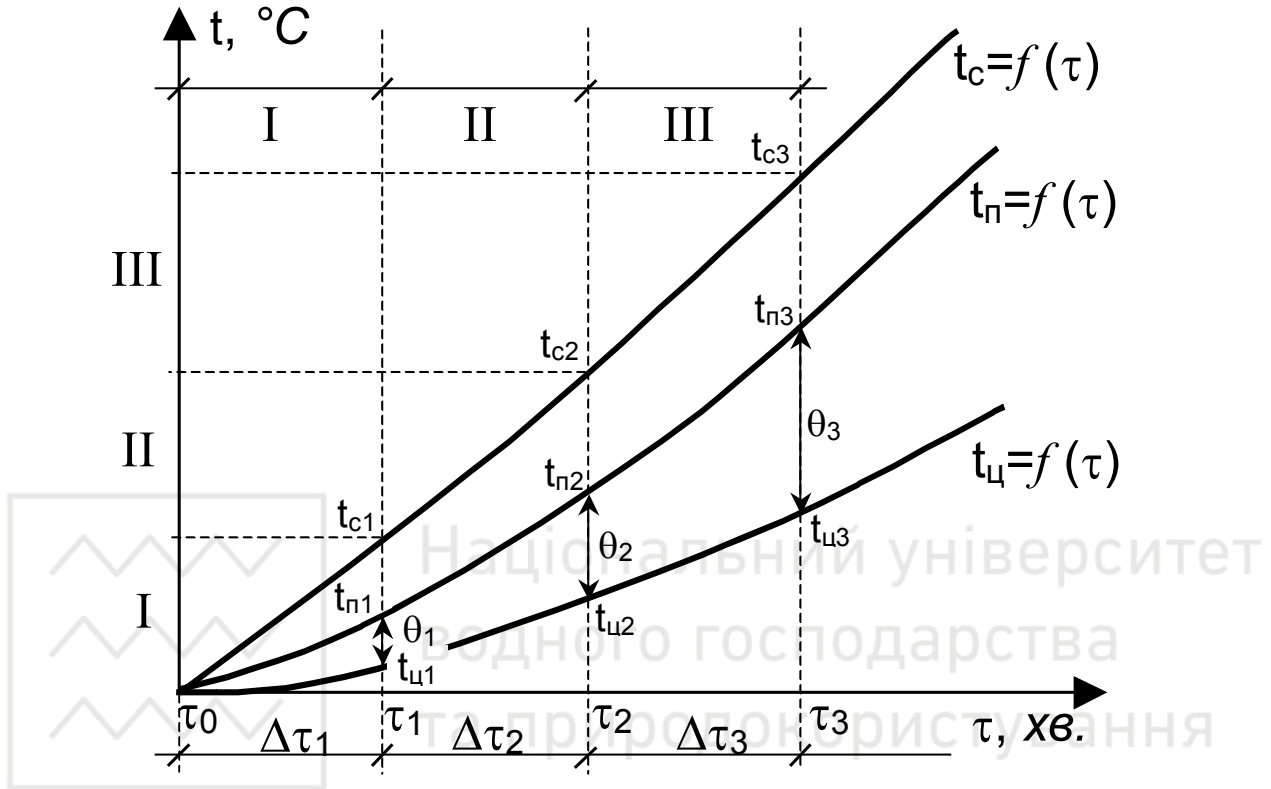




$\Delta\tau_n$  – тривалість процесу на розрахунковій ділянці, хв.

2) різниця температур по перерізу зразка на границях ділянок, °С:

$$\theta_0 = t_{\text{по}} - t_{\text{цо}}; \theta_1 = t_{\text{п1}} - t_{\text{ц1}} \text{ і т.д.}$$



**Рис. 5.2.** Приклад побудови залежностей  $t_c = f(\tau)$ ;  $t_n = f(\tau)$ ;  $t_ц = f(\tau)$

3) середня температура по перерізу зразка на границях ділянок, °С:

$$t_o^{\text{cp}} = t_{\text{по}} - 0.637 \cdot \theta_0; \quad t_1^{\text{cp}} = t_{\text{п1}} - 0.637 \cdot \theta_1 \text{ і т.д.}$$

4) середня температура перерізу зразка на ділянці, °С:

$$t_I^{\text{cp}} = \frac{t_o^{\text{cp}} + t_1^{\text{cp}}}{2}; \quad t_{II}^{\text{cp}} = \frac{t_1^{\text{cp}} + t_2^{\text{cp}}}{2} \text{ і т.д.}$$

5) критерії:  $\frac{\theta_0}{b_1 \cdot \tau_1}$ ;  $\frac{\theta_1}{b_1 \cdot \tau_1}$  і т.д.,

а у відповідності із графіком (див. рис. 5.3) в залежності від значень критеріїв знаходять критерії Фур'є ( $Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2}$ ):

$$Fo^I = f\left(\frac{\theta_0}{b_1 \cdot \tau_1}; \frac{\theta_1}{b_1 \cdot \tau_1}\right); \quad Fo^{II} = f\left(\frac{\theta_1}{b_2 \cdot \tau_2}; \frac{\theta_2}{b_2 \cdot \tau_2}\right) \text{ і т.д.}$$

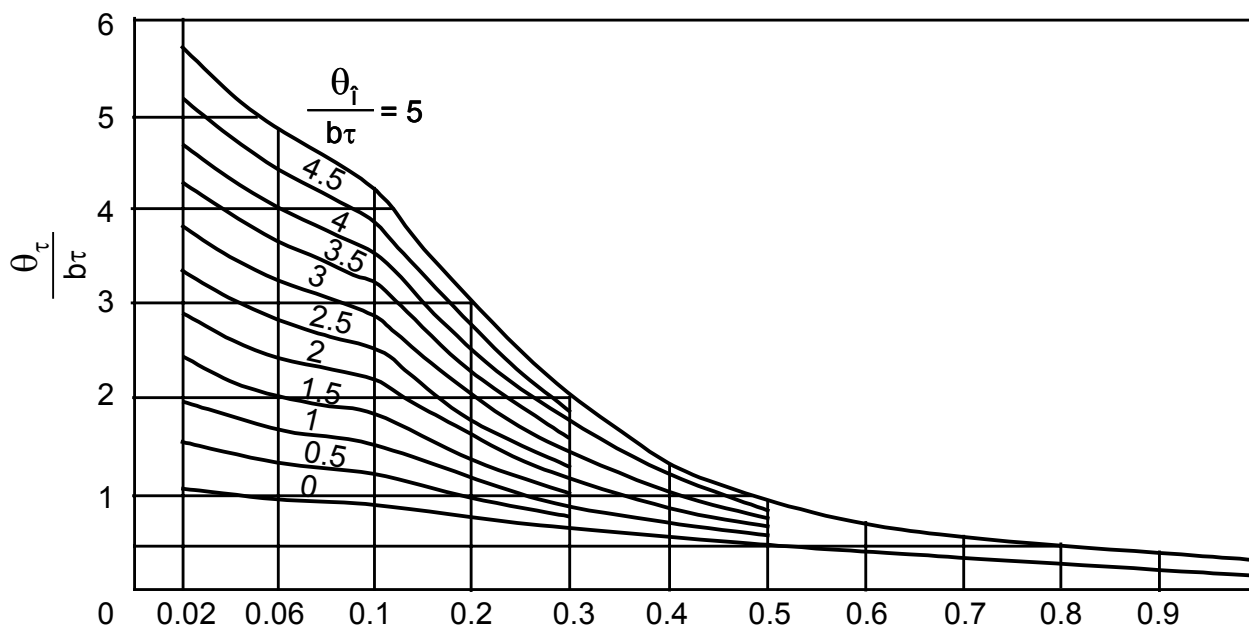


Рис. 5.3. Графік залежності критеріїв подібності

б) коефіцієнти теплопроводності з виразу:

$$a = \frac{Fo \cdot R^2}{\tau}, \text{ [м}^2\text{/ГОД]}$$

де  $R$  – відстань, (м) між термопарами 4 і 5 (див. рис. 5.1).

$$\text{Відповідно для ділянок: } a_I = \frac{Fo^I \cdot R^2}{\Delta\tau_I}; a_{II} = \frac{Fo^{II} \cdot R^2}{\Delta\tau_{II}} \text{ і т.д.}$$

Результати розрахунку коефіцієнтів теплопроводності заносяться в табл. 5.2.

4. Якщо відома теплоємність  $c$  [кДж/(кг·°C)] досліджуваного зразка матеріалу (бетону) і його середня густина  $\rho_0$  [кг/м<sup>3</sup>], то значення коефіцієнту теплопроводності досліджуваного матеріалу  $\lambda$  [Вт/(м·°C)] в розрахункових ділянках буде становити:

$$\lambda_I = 3.6 \cdot a_I \cdot c \cdot \rho_0; \lambda_{II} = 3.6 \cdot a_{II} \cdot c \cdot \rho_0 \text{ і т.д.}$$

Результати розрахунку коефіцієнтів теплопроводності також заносяться в табл. 5.2.

5. Орієнтовна кількість тепла [кДж], що затрачена на нагрів зразка від  $t_o^{cp}$  до  $t_n^{cp}$ :

$$Q = c \cdot m \cdot (t_n^{cp} - t_o^{cp}),$$



де  $m$  – маса зразка досліджуваного матеріалу, кг до початку ТО.

Таблиця 5.2

### Результати розрахунку теплофізичних характеристик матеріалу

№ ділянки	I	II	...	$n$
$t^{cp}, ^\circ C$				
$a, m^2/^\circ C$				
$\lambda, Wt/(m \cdot ^\circ C)$				

6. В висновках до роботи наводять обґрунтування отриманих результатів та порівняння їх з довідковими даними.

#### Контрольні питання.

1. Перерахувати та дати визначення теплофізичних величин, які характеризують процес теплообміну.
2. Перерахувати основні теплофізичні характеристики, які визначають процес масообміну в процесі тепловологісної обробки.
3. Описати процеси зовнішнього тепло- і масообміну.
4. Описати процеси внутрішнього тепло- і масообміну.
5. Напружений стан при тепловологісній обробці.

## 5.2. ТЕМПЕРАТУРНІ ПЕРЕПАДИ В БЕТОННИХ ВИРОБАХ ПРИ ТЕПЛОВІЙ ОБРОБЦІ

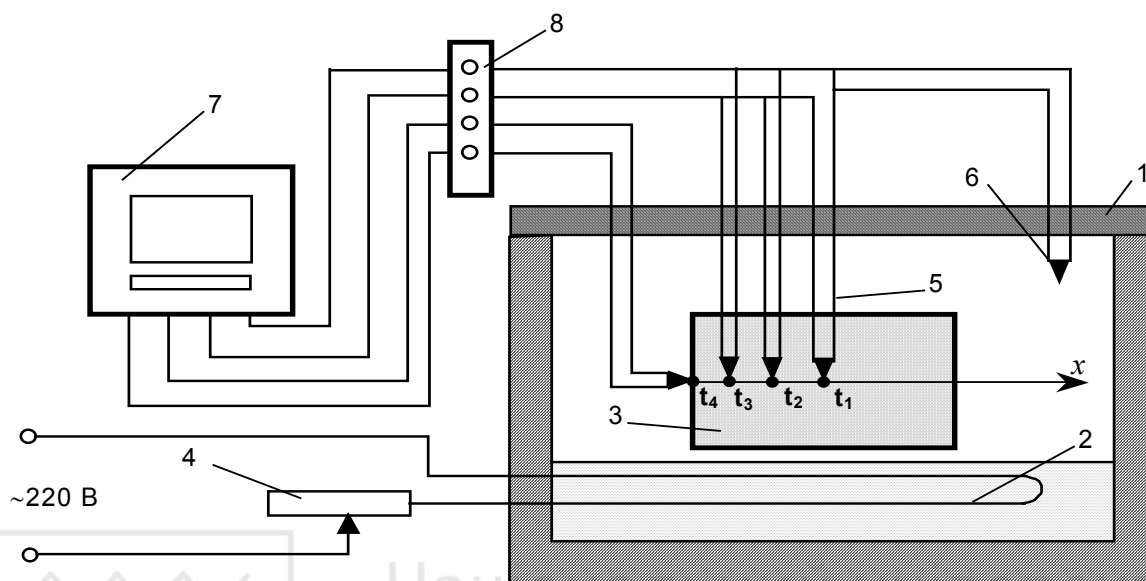
**Завдання:** Дослідити кінетику зміни температури в окремих точках виробу та її розподіл в часі.

**Обладнання і матеріали:** зразок бетону, камера теплової обробки, термопари, реєструючий прилад.

#### Опис дослідної установки.

Схема дослідної установки наведена на рис. 5.4. Виріб 3 відформовують у формі. При формуванні в нього закладаються термопари 5, які підключені до вимірювального комплексу 7. Виріб у формі, або без неї поміщають у пропарювальну камеру 1, де з допомогою нагрівача 2 створюється пароповітряне середовище. За допомогою термопари 6 вимірюються температура пароповітряного середовища  $t_c$  в камері. Температура поверхні виробу  $t_n$  ( $t_4$ ) та точок в середині виробу  $t_1$  ( $t_u$ ),  $t_2$ ,

$t_3$  вимірюються термопарами 5. При потребі можна вимірювати температуру поверхні виробу більше ніж в одній точці, а також збільшити кількість точок всередині виробу.



**Рис. 5.4.** Схема дослідної установки

1 – пропарювальна камера; 2 – нагрівальний елемент; 3 – виріб; 4 – реостат; 5, 6 – термопари; 7 – вимірювальний комплекс; 8 – термостат холодних спаїв

### Порядок виконання роботи.

1. Закласти у виріб та у камеру необхідні термопари.
2. Розмістити форму з виробом в пропарювальну камеру 1 та підключити вимірювальний комплекс 7.
3. Визначити початкові температури.

Таблиця 5.3

Дослідні дані

$\tau$ , хв.	Температура, °C				
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_c$
0					
5					
10					
...					
60					



4. Включити нагрівальний елемент 2 і виконувати виміри температури через кожні 5...10 хв. до повної стабілізації заданої температури в камері. Швидкість нагріву рекомендується витримувати близько 1°C/хв.

5. Отримані результати звести в таблицю 5.3.

### Обробка результатів.

1. За даними табл. 5.3 будують діаграми залежності  $t = f(x)$  по поперечному перерізу виробу, в початковий та кінцевий момент прогріву та в 3...4 проміжних точках протягом даного періоду.

2. Розраховують критерії подібності Фур'є і Біо для виробу через кожні 10 хв. після початку прогріву.

$$Fo = \frac{a\tau}{R^2}; Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda},$$

де  $\tau$  – час, с;  $a$  – коефіцієнт теплопроводності, м<sup>2</sup>/с;  $R$  – характерний розмір, м;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопроводності матеріалу, Вт/(м·°C).

При цьому необхідні значення  $a$ ,  $\lambda$  та  $\alpha$  знаходять експериментально (наприклад за допомогою попередньої лабораторної роботи) або використовуючи довідкові значення.

3. Використовуючи графіки для визначення безрозмірної температури в центрі та на поверхні необмеженої пластини (див. рис. 2.1 [10], або рис. 2.1 [14]) визначають безрозмірні температури  $\theta$  для тих же проміжків часу.

4. Знаходять температури центру та поверхні виробу з критеріальної залежності типу

$$\theta = \frac{t_c - t_x}{t_c - t_n} = f(Fo; Bi; x/\ell),$$

де  $t_c$ ,  $t_n$  – температура середовища і початкова температура матеріалу, °C;  $\theta$  – безрозмірна температура;  $t_x$  – температура в точці на відстані  $x$  від поверхні, °C.

При цьому підставляють замість  $t_x$  відповідно  $t_n$  або  $t_u$ . Всі розраховані дані заносять в табл. 5.4.





Дослідні дані

$\tau$ , хв.	$t_c$	$Fo$	$Bi$	$\theta$	$t_n$ , °C	$t_y$ , °C
0						
10						
20						
...						
60						

5. За даними табл. 5.4 будують графіки залежності  $t_y = f(\tau)$  і  $t_n = f(\tau)$  за дослідний період в одній системі координат.

6. Проводять аналіз отриманих результатів та записують висновок.

**Контрольні питання.**

1. Дати коротку характеристику зовнішнього і внутрішнього теплообміну при тепловій обробці.
2. Записати рівняння для процесу зовнішнього теплообміну.
3. Записати рівняння для процесу внутрішнього теплообміну.
4. Тепловиділення бетону при його тепловій обробці.
5. Зробити аналіз розподілення температури при прогріві виробів на різних стадіях теплової обробки.
6. Проаналізувати фактори, які впливають на розподілення температури у бетонному виробі.



## 6. ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ МОДУЛЬНИХ КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ

### Модуль №3

#### Процеси сушіння, випалу і плавлення матеріалів

1. Як визначити потік теплоти від сушильного агента до матеріалу при конвективному теплообміні?

- $q = \alpha(\bar{t}_{ca} + \bar{t}_{pm})$ .
- $q = \alpha(\bar{t}_{ca} - \bar{t}_{pm})$ .
- $q = \frac{\alpha}{(\bar{t}_{ca} - \bar{t}_{pm})}$ .

2. Який вид теплообміну домінує в поширених сушарках будівельної індустрії?

- Конвективний.
- Кондуктивний.
- Індуктивний.
- Променевий.

3. Який основний аеродинамічний критерій в умовах природної конвекції?

- Критерій Рейнольдса.
- Критерій Фур'є.
- Критерій Архімеда.
- Критерій Прандтля.

4. Як може переміщуватися всередині матеріалу волога при сушінні?

- Лише у вигляді рідини.
- Лише у вигляді пари.
- У вигляді рідини або пари.

5. За якою формулою визначається коефіцієнт теплопередачі крізь багат шарову плоску стінку?

- $k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$ .
- $k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$ .
- $k = \frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}$ .



6. За якою формулою можна визначити температуру в середині стінки на будь-якій відстані від плоскої поверхні?

- $t = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{\delta} x$ .
- $t_x = t_1 - \frac{q}{2\pi\lambda} \ln \frac{2rx}{d_1}$ .
- $t_x = t_1 - \frac{q}{\lambda} x$ .
- $t = t_1 + \frac{t_1 - t_2}{\delta} x$ .

7. Що називають об'ємним напруженням сушильної установки?

- Об'єм вологи, що випаровується, за 1 год з 1 м<sup>3</sup> об'єму.
- Маса вологи, що випаровується, за 1 год з 1 м<sup>2</sup> об'єму.
- Кількість енергії, що витрачається на випаровування, за 1 год на 1 т матеріалу.
- Кількість енергії, що поглинається при сушінні 1 т матеріалу за 1 год.

8. За яким принципом відбувається сушіння у пневматичній сушарці?

- За принципом прямого току.
- За принципом протитоку.
- Кондуктивно.
- Випромінюванням.

9. За яким принципом відбувається сушіння у сушарках киплячого шару?

- За принципом прямого току.
- За принципом протитоку.
- Кондуктивно.
- Випромінюванням.

10. Скільки орієнтовно займає процес сушіння в сушарці киплячого шару?

- 10...15 с.
- 50...60 хв.
- 5...10 хв.
- 5...10 год.

11. Який з наведених видів теплоносіїв не використовують в тунельних сушарках?

- Димові гази.
- Гаряче повітря.
- Насичена пара.
- Інфрачервоне випромінювання.



- 12. Що є джерелом газовиділення при спучуванні окремих глинистих порід?**
- Реакції взаємодії димових газів з компонентами матеріалу.
  - Капілярна вода в порах матеріалу.
  - Реакції розкладання і відновлення оксидів заліза і хімічно зв'язана вода.
- 13. Яка особливість роботи кільцевої печі?**
- Вироби в печі, працюючі в печі газу і відповідні зони теплової обробки переміщуються.
  - Вироби в печі, працюючі в печі газу переміщуються, а відповідні зони теплової обробки – нерухомі.
  - Вироби в печі і відповідні зони теплової обробки – нерухомі, переміщуються працюючі в печі газу.
  - Вироби в печі стоять на місці, переміщуються працюючі в печі газу і відповідні зони теплової обробки.
- 14. Чому дорівнює температура горіння в зоні випалу тунельної печі?**
- 1200°C.
  - 800°C.
  - 1450°C.
  - 1650°C.
- 15. Чим відрізняється щілинна піч від тунельної?**
- Висота робочого каналу в декілька разів перевищує ширину.
  - Меншою довжиною.
  - Ширина робочого каналу в декілька разів перевищує висоту.
  - Більшою шириною.
- 16. В якій із наведених видів печей доцільно випалювати порцелянові вироби?**
- Тунельна.
  - Муфельна.
  - Кільцева.
  - Обертова.
- 17. Яким чином здійснюється теплообмін в обертовій печі для випалу керамзиту?**
- Шляхом теплопровідності, конвекції і випромінювання.
  - Шляхом конвекції і випромінювання.
  - Шляхом теплопровідності і випромінювання.
  - Шляхом конвекції.



**18. Яка теплова установка використовується при виробництві аглопориту?**

- Вібропрокатний стан.
- Стрічкова агломераційної машина.
- Агломераційна тунельна піч.
- Шахтна піч.

**19. Що називається питомою теплотою плавлення?**

- Теплота, що витрачається на перехід одиниці маси речовини з твердого стану в рідкий при температурі плавлення.
- Теплота, що витрачається на перехід одиниці маси речовини з твердого стану в рідкий при атмосферному тиску.
- Теплота, що поглинається матеріалом при переході одиниці маси речовини з рідкого стану в твердий.

**20. До якого виду установок відносяться вагранки?**

- Обертові протитоккові печі.
- Шахтні протитоккові пересипні печі.
- Шахтні прямотокові газові печі.
- Обертові прямотокові електричні печі.

**Модуль №4**

**Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону**

**1. Що називається тепловологісною обробкою бетону?**

- Теплова обробка із використанням насиченої водяної пари.
- Теплова обробка з умовою збереження вологи в матеріалі.
- Гідротермальна теплова обробка у водних басейнах.
- Теплова обробка із використанням пароповітряного середовища.

**2. Що таке екзотермія бетону?**

- Температура розігріву бетону.
- Кількість градусо-годин, отриманих бетоном в процесі нагріву.
- Кількість виділеної бетоном теплоти.
- Кількість поглинутої бетоном теплоти.





**3. Чому орієнтовно рівне тепловиділення 1 кг цементу М500 після 28 діб твердіння в нормальних умовах?**

- 50 кДж/кг.
- 500 кДж/кг.
- 5000 кДж/кг.
- 28 МДж/кг.

**4. Розташуйте наведені матеріали в порядку зростання теплопровідності?**

- повітря → вода → водяна пара → бетон.
- повітря → водяна пара → вода → бетон.
- бетон → вода → водяна пара → повітря .
- водяна пара → повітря → вода → бетон.

**5. Яку кількість тепла може віддати 1 кг насиченої водяної пари?**

- 2500 кДж.
- 1500 Дж.
- 419 кДж.
- 29300 кДж.

**6. Коефіцієнт тепловіддачі пароповітряної суміші збільшується при...**

- зменшенні швидкості суміші і відносної вологості середовища, збільшенні температури
- зменшенні швидкості суміші, збільшенні температури і відносної вологості середовища
- зменшенні швидкості суміші, температури і відносної вологості середовища
- збільшенні швидкості суміші, температури і відносної вологості середовища

**7. Якими параметрами характеризується режим тепловологісної обробки?**

- Швидкість нагріву і охолодження, вологість середовища.
- Тривалість кожного періоду, максимальна температура ізотермічного прогріву.
- Тривалість кожного періоду, максимальна температура ізотермічного прогріву, вологість середовища.
- Тривалість попереднього витримування, максимальна температура ізотермічного прогріву, швидкість охолодження.



**8. Які умови відповідають жорстким режимам тепловологісної обробки?**

- Коротке попереднє витримування, швидкий підйом температури, висока температура ізотермічного прогріву, недостатньо вологе середовище.
- Тривале попереднє витримування, швидкий підйом температури, висока температура ізотермічного прогріву, максимально вологе середовище.
- Коротке попереднє витримування, повільний підйом температури, низька температура ізотермічного прогріву, недостатньо вологе середовище.
- Тривале попереднє витримування, повільний підйом температури, висока температура ізотермічного прогріву, максимально вологе середовище

**9. За якими режимами доцільно пропарювати масивні вироби?**

- За м'якими.
- За жорсткими.
- За комбінованими.

**10. Від якого періоду теплової обробки можна відмовитись при використанні добавок – прискорювачів твердіння?**

- Від нагріву.
- Від ізотермічного витримування.
- Від попереднього витримування.
- Від охолодження.

**11. Максимальний перепад температур між поверхнею виробів і навколишнім середовищем не повинен перевищувати...**

- 60°C.
- 40°C.
- 20°C.
- 35°C.

**12. В якій тепловій установці проходить обробка в середовищі чистої насиченої пари?**

- В ямній камері.
- В автоклаві.
- В касетній установці.

**13. З якою метою в ямних камерах використовують гідрозатвори?**

- Для відведення конденсату із камери.
- Для регулюванні подачі пари в камеру.
- Для запобігання вибивання пари із камери.



- 14. Які максимальні параметри середовища можна отримати в безнапірній пропарювальній камері типу Л.А.Семенова?**
- $\varphi = 100\%$ ;  $t = 100^\circ\text{C}$ .
  - $\varphi = 90\%$ ;  $t = 80^\circ\text{C}$ .
  - $\varphi = 100\%$ ;  $t = 180^\circ\text{C}$ .
  - $\varphi = 0\%$ ;  $t = 100^\circ\text{C}$ .
- 15. Яким способом здійснюється теплообмін в касетних установках і термоформах?**
- Конвективним.
  - Кондуктивним.
  - Випромінюванням.
  - Індуктивним.
- 16. Яке із наведених значень надлишкового тиску не зустрічається в автоклаві?**
- 1,2 МПа.
  - 1600 кПа.
  - 2,5 МПа.
  - 4500 кПа.
- 17. Які переваги полігональних камер у порівнянні із щілинними?**
- Менша довжина.
  - Можливість влаштування зони із середовищем чистої пари.
  - Можливість використання димових газів.
  - Можливість використання "глухої" пари.
- 18. За допомогою яких пристроїв можна здійснювати електрообігрівання бетону випромінюванням?**
- Стержневі електроди.
  - ТЕНи.
  - Смугові електроди.
  - Індуктори.
- 19. Як визначити кількість тепла, що виділяється при електродному прогріванні?**
- $Q = IU \cdot (t_2 - t_1)$ .
  - $Q = a \cdot c \cdot \rho$ .
  - $Q = \frac{a \cdot \tau}{R}$ .
  - $Q = 3,6IU \cdot \tau$ .
- 20. Як впливає вентиль або засувка на ентальпію пари після проходження нею цих перешкод ?**
- Ентальпія зменшується.
  - Ентальпія зростає.
  - Ентальпія залишається незмінною.



## 7. ЗАВДАННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ РОБОТИ

---

### 7.1. Загальні вимоги до оформлення роботи

Індивідуальна робота студентів представлена курсовою роботою, яка виконується в 7 семестрі. Курсова робота є окремим заліковим кредитом навчальної дисципліни і оцінюється як самостійний вид навчальної діяльності студента.

Курсова робота №2 стосується технології виробництва бетонних або залізобетонних виробів і представляє собою технологічний і теплотехнічний розрахунок установки для тепловологісної обробки.

Робота включає пояснювальну записку (до 25-30 сторінок) із схемами та ескізами теплової установки. Пропонується наступний склад роботи: вступ, опис теплової установки, вибір режиму теплової обробки, конструктивно-технологічний розрахунок, розрахунок тепловиділення бетону, матеріально-теплові баланси, гідравлічний розрахунок, розрахунок котлоагрегату та горіння палива, техніко-економічні показники роботи теплової установки, список використаної літератури.

Робота оформляється у вигляді зброшурованого звіту на стандартних аркушах формату А4 рукописним способом або за допомогою друкарських пристроїв. Графічна частина має бути представлена аркушем формату А2, на якому зображується ескіз теплової установки, графіки режиму теплової обробки, гідравлічна схема, схема паророзподілу.

Вихідні дані, які необхідні для виконання курсової роботи, вказуються в завданні, яке видається викладачем. Студентам також надається право вільного вибору теми роботи із запропонованого кафедри переліку або пропонувати свої теми. В завданні на курсову роботу вказується, тип теплової установки, продуктивність лінії виробництва виробів та їх характеристики, клас бетону, тривалість циклу формування та кількість робочих змін, вид палива, що застосовується.

Робота повинна бути виконана у повній відповідності із завданням. На титульній сторінці необхідно вказати назву вищого навчального закладу, кафедру, тему курсової роботи, прізвище, ім'я та по батькові студента, посаду, прізвище та ініціали викладача, що перевіряє та приймає роботу.



Студент, що виконав роботу не за варіантом а також не у відповідності із зазначеними вимогами не допускається до її захисту.

*Критерії оцінювання курсової роботи наведені в розділі 2 інтерактивного комплексу.*

## 7.2. Приклади завдань на курсову роботу

Нижче наведено деякі типові завдання до виконання курсової роботи №2.

### *Завдання №1*

---

Тема роботи:	<i>Теплова обробка пустотних плит перекриття в ямних камерах</i>
Тип теплової установки:	<i>Пропарювальна камера ямного типу.</i>
Тип виробу:	<i>Пустотні плити перекриття 6000×1500×220 мм.</i>
Продуктивність лінії виробництва:	<i>10000 м<sup>3</sup>/рік, кількість змін – 2.</i>
Клас бетону:	<i>B25.</i>
Об'єм бетону на виріб:	<i>1.121 м<sup>3</sup>.</i>
Маса арматури:	<i>67 кг.</i>
Тривалість циклу формування:	<i>12 хв.</i>
Початкова міцність бетону:	<i>0.4 МПа.</i>
Паливо:	<i>Донецьке коксове кам'яне вугілля (К).</i>

---

### *Завдання №2*

---

Тема роботи:	<i>Теплова обробка стінових панелей в касетній установці</i>
Тип теплової установки:	<i>Касетна установка.</i>
Тип виробу:	<i>Зовнішні стінові панелі 6200×1800×200 мм.</i>
Продуктивність лінії виробництва:	<i>25000 м<sup>3</sup>/рік, кількість змін – 3.</i>
Клас бетону:	<i>B7.5 (керамзитобетон).</i>
Об'єм бетону на виріб:	<i>1.785 м<sup>3</sup>.</i>
Маса арматури:	<i>61,3 кг.</i>
Тривалість циклу формування:	<i>28 хв.</i>
Початкова міцність бетону:	<i>0.3 МПа.</i>
Паливо:	<i>Донецький напівантрацит (ПА).</i>

---





### **Завдання №3**

---

Тема роботи:	<b>Теплова обробка напірних віброгідропресованих труб в термоформі</b>
Тип теплової установки:	<b>Термоформа.</b>
Тип виробу:	<b>Напірні віброгідропресовані труби 5000×500 мм.</b>
Продуктивність лінії виробництва:	<b>8000 м<sup>3</sup>/рік, кількість змін – 2.</b>
Клас бетону:	<b>V40.</b>
Об'єм бетону на виріб:	<b>0.53 м<sup>3</sup>.</b>
Маса арматури:	<b>55,7 кг.</b>
Тривалість циклу формування:	<b>35 хв.</b>
Паливо:	<b>Мазут сірчистий (марка 10).</b>

---

### **Завдання №4**

---

Тема роботи:	<b>Теплова обробка автоклавних стінових блоків</b>
Тип теплової установки:	<b>Автоклав.</b>
Тип виробу:	<b>Стінові блоки 300×300×600 мм.</b>
Продуктивність лінії виробництва:	<b>35000 м<sup>3</sup>/рік, кількість змін – 3.</b>
Клас бетону:	<b>V3.5 (газобетон, литтєва технологія).</b>
Об'єм бетону на виріб:	<b>0.054 м<sup>3</sup>.</b>
Маса арматури:	<b>61,3 кг.</b>
Тривалість циклу формування:	<b>20 хв.</b>
Паливо:	<b>Природний газ (Шебелинське родовище).</b>

---

### **Завдання №5**

---

Тема роботи:	<b>Теплова обробка тротуарних плит в щільній камері</b>
Тип теплової установки:	<b>Щільна пропарювальна камера.</b>
Тип виробу:	<b>Плити тротуарні 800×800×80 мм.</b>
Продуктивність лінії виробництва:	<b>23000 м<sup>3</sup>/рік, кількість змін – 2.</b>
Клас бетону:	<b>V25.</b>
Об'єм бетону на виріб:	<b>0.0512 м<sup>3</sup>.</b>
Маса арматури:	<b>1,3 кг.</b>
Тривалість циклу формування:	<b>10 хв.</b>

---



---

Початкова міцність бетону:	0.4 МПа.
Паливо:	Природний газ (Джанкойське родовище).

---

### **Завдання №6**

---

Тема роботи:	<b>Теплова обробка ребристих панелей в тунельній камері</b>
Тип теплової установки:	Пропарювальна камера тунельного типу.
Тип виробу:	Панелі покриття ребристі 6300×1200×200 мм
Продуктивність лінії виробництва:	18000 м <sup>3</sup> /рік, кількість змін – 3.
Клас бетону:	B15.
Об'єм бетону на виріб:	0.561 м <sup>3</sup> .
Маса арматури:	33 кг.
Тривалість циклу формування:	20 хв.
Початкова міцність бетону:	0.4 МПа.
Паливо:	Кам'яне вугілля газове (Львівсько-Волинський басейн).

---

### **Завдання №7**

---

Тема роботи:	<b>Теплова обробка стінових блоків у вертикальній камері</b>
Тип теплової установки:	Вертикальна камера.
Тип виробу:	Стінові блоки 400×200×200 мм
Продуктивність лінії виробництва:	55000 м <sup>3</sup> /рік, кількість змін – 3.
Клас бетону:	B3.5 (керамзитобетон).
Об'єм бетону на виріб:	0.016 м <sup>3</sup> .
Маса арматури:	–
Тривалість циклу формування:	18 хв.
Початкова міцність бетону:	0.2 МПа.
Паливо:	Крекінг-мазут топковий сірчистий (марка 100).

---



## 7.3. Рекомендації до виконання курсової роботи

Наведені рекомендації стосуються окремих розділів курсової роботи. Більш повно дані рекомендації викладені в "Методичних вказівках до виконання курсової роботи №2 з дисципліни "Основи термодинаміки, теплотехніка і теплотехнічне обладнання" (розділ "Теплова обробка бетонних і залізобетонних виробів") [13].

### 7.3.1. Вибір режиму тепловологісної обробки

Ефективним вважається такий режим ТВО, який дозволяє отримувати бетон заданої міцності при мінімальній витраті в'язучого і теплової енергії. Режим пропарювання повинен забезпечувати досягнення бетоном після ТВО певного значення відпускної (відносної) міцності (в % від  $R_{28}$ , як правило 70%).

Режим ТВО (рис. 7.1) включає в себе параметри періодів нагріву, ізотермічного прогріву (при  $t_{\max}$ ) і охолодження.

Повний цикл ТВО складається з наступних періодів:

- попереднє витримування при  $t$  навк. середовища  $\tau_{\text{п.в.}}$ ;
- нагріву  $\tau_{\text{н.}}$ ;
- ізотермічного витримування (прогріву)  $\tau_{\text{із.}}$ ;
- охолодження  $\tau_{\text{ох.}}$ ;

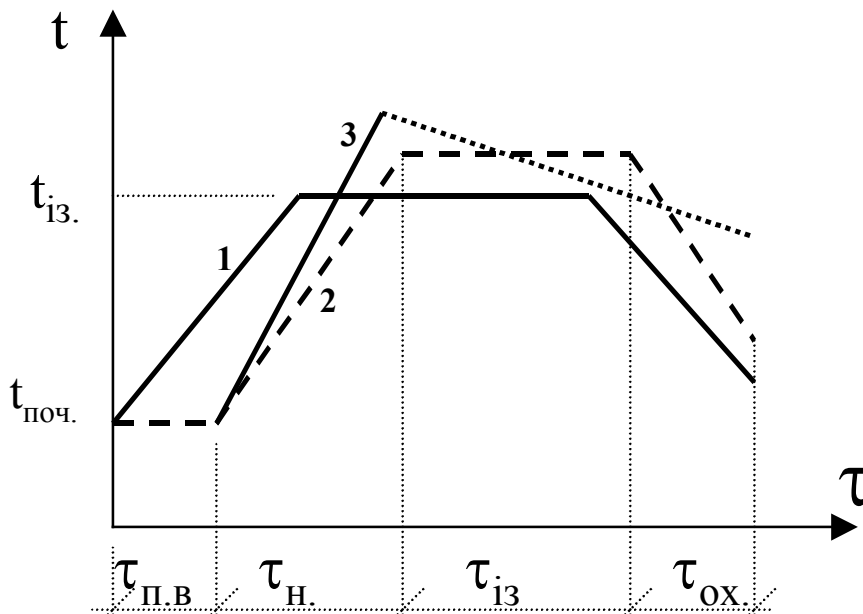


Рис. 7.1. Режими тепловологісної обробки:

1 – "звичайний" режим; 2 – режим з попереднім витримуванням; 3 – "піковий" або термосний режим (застосовується при достатньо хорошій теплоізоляції теплової установки – напр., для касетних установок)



При призначенні режиму ТВО необхідно враховувати такі моменти:

– тривалість попередньої витримки тим коротша, чим коротші строки тужавлення цементу;

– тривалість нагріву тим більша, чим більшою є рухливість бетонної суміші, меншою тривалість попередньої витримки, більшою масивність та площа відкритої поверхні виробів;

– тривалість ізотермічного прогріву повинна бути тим більшою, чим більшою є необхідна міцність бетону при інших рівних параметрах.

– максимальна температура ізотермічного прогріву залежить від виду цементу, що застосовується:

для звичайних портландцементів  $t = 60...85^{\circ}\text{C}$  (рекомендовано  $80...85^{\circ}\text{C}$ );

для ШПЦ і пуцоланових цементів –  $90...115^{\circ}\text{C}$  (рекомендовано  $90...95^{\circ}\text{C}$ );

для цементів, що містять тонкомелені кремнеземисті компоненти –  $170...220^{\circ}\text{C}$  при підвищених тисках.

– вироби повинні охолоджуватись тим довше, чим вони більш масивні, причому з легкого бетону повільніше ніж з важкого.

*Попереднє витримування* необхідне для створення сприятливих умов для протікання процесів гідратації і формування початкової структури, що здатна протидіяти деструктивним процесам, викликаним градієнтами температури, вологовмісту бетону і тиску.

Попереднє витримування є обов'язковим при ТО розпалублених виробів, а також виробів з відкритим модулем відкритої поверхні. Залежно від швидкості підйому температури, жорсткості суміші та ін. факторів тривалість попереднього витримування складає від 1...2 до 4...8 год.

Від попереднього витримування можна відмовитись при використанні прискорювачів твердіння, жорстких сумішей, герметичних форм, при застосуванні розігрітих бетонних сумішей та при ТО з тривалим  $\tau_{\text{н}}$ .

Недоцільним є витримування виробів в касетах і термоформах.

Вироби з ніздрюватих бетонів витримують до набуття ними міцності, достатньої для транспортування їх в автоклав і запобігання появи тріщин при ТО. Тривалість попереднього витримування, при цьому, може становити 2...10 год. в залежності від особливостей технології.

*Швидкість підйому температури* залежить від початкової міцності бетону, пластичності бетонної суміші, розмірів і модуля відкритої поверхні виробів.



*Тривалість ізотермічного витримування* залежить в основному від жорсткості бетонної суміші і від температури витримування. При атмосферному тиску і невисоких температурах (до 60°C) і використанні пластичних бетонних сумішей  $\tau_{із}$  доходить до 18...20 год. Для жорстких сумішей цей час скорочується вдвічі, підвищення температури з 60°C до 100°C зменшує цей період в 4...5 разів.

При автоклавній обробці нагрів виробів і ізотермічна витримка відбувається на протязі короткого терміну, що дозволяє скоротити весь цикл ТО до 6...8 год.

*Зниження температури* середовища в камерах, тобто цикл охолодження повинен проводитись поступово зі швидкістю 20...30°C/год (залежно від товщини виробу і проектного класу бетону. При цьому перепад температур між поверхнею виробів і навколишнім середовищем не повинен перевищувати 40°C.

## Довідкові дані для вибору режиму ТВО

**Швидкість підйому** температури залежить від початкової міцності бетону, пластичності бетонної суміші, розмірів і модуля відкритої поверхні (див. табл. 3.3).

В залежності від товщини виробів швидкість підйому температури бетону рекомендується приймати відповідно до табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Залежність швидкості нагріву від товщини виробів

Товщина виробів, мм	Швидкість нагріву, °C/год
<100	30
100...250	25
250...400	15...20
>400	10...15

Рекомендовані значення **температури ізотермічного прогріву** для бетонів на основі:

- портландцементів .....80...85°C
- ШПЦ і пуцоланових цементів .....90...95°C
- тонкомелених кремнеземистих компонентів.....170...220°C.

Розрахункові режими ТВО виробів із важкого бетону в різних теплових установках наведені в табл. 7.2-7.4.





Таблиця 7.2

Розрахункові режими ТВО виробів із важкого бетону при  $t_{iz} = 80...85 \text{ }^\circ\text{C}$

Клас бетону	Режим ТВО, год, при товщині виробу, мм		
	<160	160...300	300...400
В 15*	3,5+5,5+2	3,5+6,5+2	3,5+6,5+3
В 25	3+4+2	3+5+2	3+6,5+2,5
В 30	3+3,5+2	3+4,5+2	3+5+2,5
В 40	3+3+2	3+4+2	3+4,5+2,5
В 45	3+2+2	3+3+2	3+3,5+2,5

\* Для класів бетону менше В15 назначається або збільшується тривалість попередньої витримки, при цьому за основу приймається розрахунковий режим ТВО для класу В15.

Таблиця 7.3

Режими ТВО виробів із важкого бетону при виготовленні в касетах і пакетах термоформ\*\*

Проектні класи бетону	Товщина бетону у виробі, мм	Режим ТВО при 80...90°C, год.
В 12,5	До 100	1+4+4
В 12,5	100...200	1+5+5
В 15	До 100	1+3,5+3,5
В 15	100...200	1+4+4,5
В 25	До 100	1+3+3
В 25	100...200	1+3,5+4

\*\* 1. Режим передбачає розташування парових відсіків через два робочих відсіки (прогрів виробів – односторонній). При двосторонньому прогріві тривалість ізотермічної витримки зменшується на 1 год. 2. Перша цифра в режимі означає тривалість підйому температури у відсіку, друга – ізотермічну витримку з подачею пари, третя – "термосна" витримка без подачі пари. 3. При менших класах бетону до 2-ї та 3-ї цифри в режимі додається по 0,5 год.

Таблиця 7.4

Орієнтовні режим ТВО для віброгідропресованих труб в термоформах

Умовний діаметр труби, $D_v$ , мм	Тривалість ТО, год***	
	двостороння ТО	одностороння ТО
500	1+4	1+6
800	1+6	1+9
1200	1+8...9	1+12...13

\*\*\* Тривалість охолодження приймається у відповідності із загальними нормами проектування.



## Особливості ТВО виробів з легких бетонів

Режим ТВО повинен забезпечити значення відпускної вологості виробів з легких бетонів, що не перевищує 13% за об'ємом.

Для забезпечення таких умов ТВО варто проводити в умовах, що сприяють випаровуванню вологи з виробів (в камерах, що обладнані реєстрами, ТЕНами, теплогенераторами для спалювання природного газу). При цьому максимальна температура максимальна температура ізотермічного прогріву в камерах сухого прогріву може бути збільшена до 120...150°C.

Допускається проводити ТВО з  $\varphi = 85...95\%$  і  $t = 90...95^\circ\text{C}$  при створенні необхідних умов для забезпечення відпускної вологості.

Розрахункові режими пропарювання виробів з легких бетонів наведені в табл. 3.6. Інші дані для вибору параметрів режиму наведені в табл. 7.5-7.7.

Таблиця 7.5

Тривалість попередньої витримки для конструктивно-теплоізоляційних бетонів (умовно  $\leq B 7,5$ )

Об'єм втягнутого повітря, %	Ж, с	$\tau_{п.в.}$ , ГОД*
0...5	15...20	0,5...1
5...10	10...15	1...1,5
5...10	5...10	1,5...2,5
10...15	$\leq 5$	2,5...3,5

\* При застосуванні попереднього розігріву бетонної суміші  $\tau_{п.в.} = 0,5...1$  год.

Таблиця 7.6

Швидкість підйому температури для виробів з конструктивно-теплоізоляційних бетонів (умовно  $\leq B 7,5$ )

Спосіб ТО	Швидкість нагріву, °C/год, не більше
Сухий прогрів в камерах	50
Прогрів в термоформах	40
Пропарювання в камерах	30

Швидкість охолодження після ізотермічного прогріву не повинна перевищувати 40°C/год.

Різниця між температурою поверхні виробів та температурою навколишнього середовища не повинна перевищувати 40°C.



Таблиця 7.7

Тривалість ізотермічного прогріву для виробів з конструктивно-теплоізоляційних бетонів (умовно  $\leq B 7,5$ )

Спосіб ТО	$\tau_{із.}$ , год**
Сухий прогрів (до 150°C)	6...8
Пропарювання в термоформах і касетах при 95...100°C	5...7
Пропарювання в камерах гострою парою при 85...95°C	4...6
ТО із застосуванням попереднього розігріву бет. суміші	4...6

\*\* Більші значення – для виробів товщиною 300...400 мм, менші – 200...300 мм.

Режими ТО для **конструктивних легких бетонів** (умовно  $\geq B 10$ ) приймаються аналогічно до важких бетонів, при цьому враховуються заходи по зниженню  $\phi$  в тепловому агрегаті, а тривалість охолодження приймається відповідно до табл. 7.8.

Таблиця 7.8

Тривалість охолодження для виробів з конструктивних бетонів

Товщина виробу, мм	Тривалість охолодження в камері, год. при $t^\circ$ навколишнього середовища (повітря), $^\circ C$		
	+30...+20	+20...+10	+10...-10
< 200	0,5...1	1...1,5	1,5...2,5
200...300	1...1,5	1,5...2	2...3
> 300	1,5...2	2...2,5	2,5...3,5

## Автоклавна обробка

Дані для вибору режимів ТВО в середовищі насиченої пари наведені в табл. 7.9-7.10.

Таблиця 7.9

Тривалість визрівання\* (попередньої витримки) газобетонів на цементному в'язучому, год.

Технологія формування	Особливості формування		
	в індивідуальних формах	при різальній технології	для теплоізоляційних матеріалів
литтєва	4	6	7
вібраційна	3	4	5

\* Для пінобетонів тривалість визрівання можна приймати  $\sim 8$  год.



Таблиця 7.10

Розрахункові режими автоклавної обробки ніздрюватих бетонів\*\*

Середня густина бетону, кг/м <sup>3</sup>	Товщина виробу, мм	Режим ТВО, год
350...450	100	1+5+0,5+1
	200	1+6+0,5+1
	300	1+8+1+1
500...800	100	1+7+1+1
	200	1+8+1+1
	300	1+10+1,5+1

\*\* Цифри в режимі ТВО означають: перша – підйом температури приблизно до 100°C, друга – підйом зі 100 до 183°C + ізотермічний прогрів + підйом тиску до 1,2 МПа, третя – спуск тиску і охолодження до 100°C, четверта – охолодження і вакуумування.

### 7.3.2. Технологічні параметри та конструктивні характеристики теплової установки

Річний фонд часу роботи обладнання поста ТО, год визначається за формулою:

$$T_{\text{річ}} = (T_{\text{н}} - T_{\text{рем}} - T_{\text{перен}}) \cdot T_{\text{доб}},$$

де  $T_{\text{н}}$  – номінальний фонд часу роботи обладнання (можна приймати  $T_{\text{н}} = 262$  доби);  $T_{\text{рем}}$  – планові зупинки на ремонт (приймаються з табл.7.11);  $T_{\text{перен}}$  – втрати робочого часу пов'язані з переналадками формувального обладнання (приймаються з табл.7.12);  $T_{\text{доб}}$  – добовий фонд робочого часу, год.

Таблиця 7.11

Планові зупинки на ремонт

Технологічні лінії	$T_{\text{рем}}$ , діб
Агрегатно-потоківі, стендові, касетні	7
Конвеєрні	13

Добовий фонд робочого часу, год визначається за формулою:

$$T_{\text{доб}} = n_{\text{зм}} \cdot t_{\text{зм}} \cdot K_{\text{вз}},$$

де  $n_{\text{зм}}$  – кількість робочих змін на добу, год;  $t_{\text{зм}}$  – тривалість робочої зміни, год;  $K_{\text{вз}}$  – коефіцієнт внутрішньозмінного виробничого використання робочого часу ( $K_{\text{вз}} = 0,77$  – для агрегатно-потоківого і стендового виробництва;  $K_{\text{вз}} = 0,80$  – для конвеєрного і касетного виробництва).



Таблиця 7.12

Витрати робочого часу пов'язані з переналадками формувального обладнання

Технологія виробництва	T <sub>перен</sub> при способі виконання і змінності роботи					
	Переналадки винесені на спец. пости		Переналадки частково винесені на спец. пости		Всі переналадки виконуються на лінії	
	2-х зм.	3-х зм.	2-х зм.	3-х зм.	2-х зм.	3-х зм.
Конвеєрна, вкл. касетно-конвеєрна	2	3	3	4	–	–
Агрегатно-потокова	1	2	1	2	–	–
Стендова	–	–	2	3	4	6
Касетна	–	–	3	5	4	6

Розрахункова годинна продуктивність лінії, шт/год:

$$\Pi_{\text{год}} = \frac{\Pi_{\text{річ}}}{V_{\text{б}} \cdot T_{\text{річ}}},$$

де  $\Pi_{\text{річ}}$  – річна продуктивність лінії, м<sup>3</sup>/год;  $V_{\text{б}}$  – об'єм бетону на один виріб, м<sup>3</sup>.

**Розрахунок геометричних параметрів камери (установки)**

Основні габаритні розміри камери визначаються на основі ескізу укладки виробів (або вагонеток з виробами) в камері.

◆ Я м н і к а м е р и .

Довжина камери:

$$L_{\text{к}} = n_1 \cdot l_{\text{ф}} + (n_1 + 1) \cdot 0,1$$

Ширина і висота камери:

$$B_{\text{к}} = n_2 \cdot b_{\text{ф}} + (n_2 + 1) \cdot 0,1$$

$$H_{\text{к}} = (h_{\text{ф}} + 0,05) \cdot n_3 + 0,2 + 0,15$$

де  $n_1, n_2, n_3$  – кількість виробів, що укладаються відповідно по довжині, ширині і висоті;  $l_{\text{ф}}, b_{\text{ф}}, h_{\text{ф}}$  – відповідно довжина, ширина і висота





форми з виробом; 0,1; 0,05; 0,2; 0,15 – технологічні зазори відповідно між формами а також між формами і стінками камери.

Розміри форм і ескіз розташування виробів з формами в камері (рис. 7.2) приймаються в залежності від виду виробів а також технологічних особливостей (напр., вироби в камерах знаходяться частково розпалубленими або безпосередньо в формах).

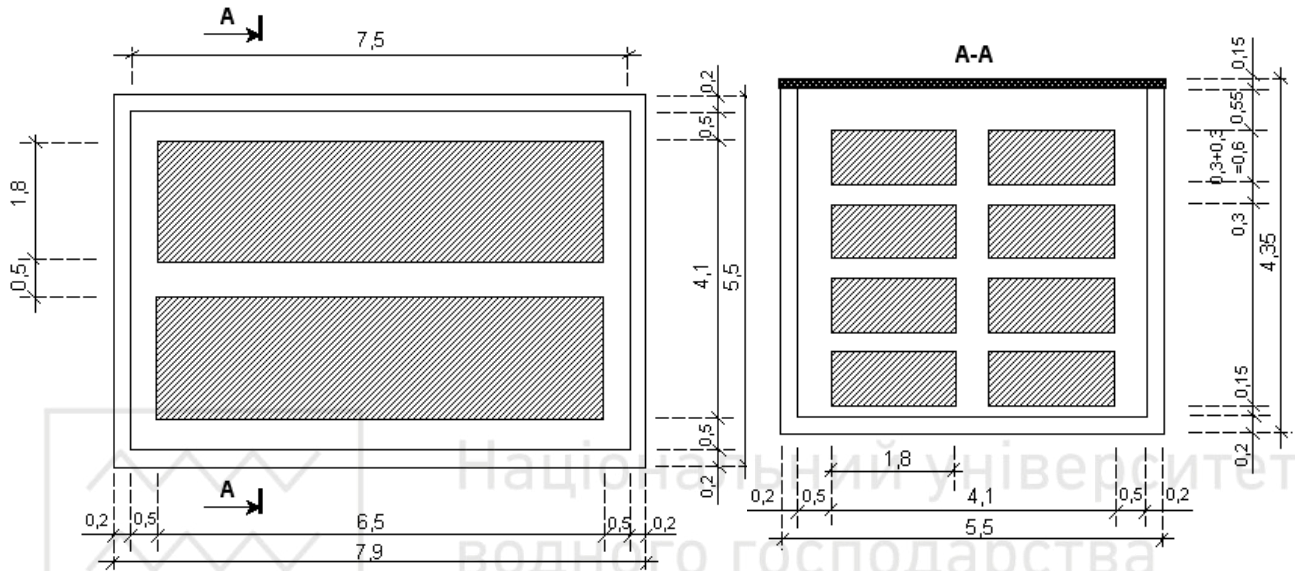


Рис. 7.2. Приклад ескізу розташування виробів в ямній камері

Необхідна кількість камер визначається продуктивністю технологічної лінії.

При цьому необхідно враховувати, що пост ТО може обслуговувати декілька формувальних ліній.

Розрахункова кількість камер:

$$N_k = \frac{P_{\text{річ.}}}{C_{\text{р.з.}} \cdot V_k},$$

де  $P_{\text{річ.}}$  – річна продуктивність лінії виробництва  $\text{м}^3/\text{рік}$ ;  $V_k$  – внутрішній об'єм камери ( $V_k = L_k \cdot B_k \cdot H_k$ ),  $\text{м}^3$ ;  $C_{\text{р.з.}}$  – річний зйом продукції з  $1\text{м}^3$  камери,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$$C_{\text{р.з.}} = T'_{\text{річ.}} \cdot O_k \cdot K_z,$$

де  $T'_{\text{річ.}}$  – річний фонд часу роботи, діб;

$O_k$  – коефіцієнт обороту камери, к-сть раз на добу:

$$O_k = \frac{24}{T_{\text{ц}}} \cdot K_0,$$

де  $T_{\text{ц}}$  – тривалість циклу камери;



$$T_{ц} = \frac{\tau_{зав} + \tau_{розв} + \tau_{ТО}}{K_{д}},$$

де  $\tau_{зав}$ ,  $\tau_{розв}$  – тривалість завантажувально-розвантажувальних робіт, год. (залежить від виду виробів, їх кількості, особливостей технології і т.ін.);  $\tau_{ТО}$  – тривалість теплової обробки, год.

Сумарну тривалість ( $\tau_{зав} + \tau_{розв}$ ) можна приймати в межах 15...30% від  $\tau_{ТО}$ .

$K_0$  – коефіцієнт організації технологічного процесу (враховує можливі простої в роботі):  $K_0=0,6...0,7$  для 2-х змінної роботи;  $K_0 = 0,85...0,95$  для 3-х змінної роботи;

$K_{\partial}$  – коефіцієнт додаткових робіт в камері (відкривання-закривання кришок, чистка камери тощо):

– для заводів із річною продуктивністю 5...15 тис.м<sup>3</sup>:  $K_{\partial} = 0,91$ ;

.....15...50 тис.м<sup>3</sup>:  $K_{\partial} = 0,94$ .

$K_3$  – коефіцієнт завантаження камери:

$$K_3 = \frac{\sum V_{\partial}}{V_{к}},$$

де  $\sum V_{\partial}$  – сумарний об'єм бетону виробів в установці;  $V_{к}$  – внутрішній об'єм камери.

Після розрахунку кількості установок необхідно узгодити годинну продуктивність поста ТО (або всієї технологічної лінії)  $\Pi_{год}$  з продуктивністю формувального конвеєра  $\Pi_{год}^{\phi}$ :

$$\Pi_{год} \approx \Pi_{год}^{\phi} = \frac{60}{T_{ц.ф}},$$

де  $T_{ц.ф}$  – тривалість циклу формування одного виробу або групи однотипних дрібноштучних виробів, хв.

Для прикладу є пост ТО з  $\Pi_{год} = 12$  вир/год і формувальний конвеєр з  $T_{ц.ф} = 15$  хв. Тоді для забезпечення сумарної продуктивності лінії необхідно передбачити роботу трьох формувальних конвеєра на 1 пост ТО:

$$\Pi_{год}^{\phi} = 3 \cdot \frac{60}{15} = 12 \text{ вир/год.}$$



При виробництві дрібнорозмірних виробів необхідно враховувати можливість одночасного формування декількох виробів ( $n$ ). Тоді продуктивність одного формувального конвеєра збільшиться в  $n$  разів.

*Узгодження продуктивності поста ТО і формувального конвеєра необхідно проводити для будь-яких типів установок.*

---

#### ◆ К а с е т н і у с т а н о в к и .

---

При розрахунку касетних установок необхідно попередньо задати кількість формувальних відсіків в одній касеті (найчастіше від 6 до 16) а також прийняти схему розташування формувальних і парових відсіків (односторонній або двосторонній прогрів) (див. рис. 3.19).

Коефіцієнт обороту касети за добу:

$$O_k = \frac{24}{T_{\text{ц}}} = \frac{24}{\tau_1 + a(\tau_2 + \tau_3 + \tau_4) + \tau_5} \cdot K_0,$$

де  $T_{\text{ц}}$  – тривалість одного циклу касетної установки;  $\tau_1$  – тривалість підготовчих операцій при обробці касети (0,8...1 год);  $\tau_2$  – тривалість розпалубки одного виробу (0,1...0,2 год);  $\tau_3$  – операції по збиранню відсіку (чистка, змащення, укладання арматурних каркасів і закладних деталей, збирання касет і т.ін.) – 0,15...0,3 год;  $\tau_4$  – тривалість формування одного відсіку (в даному випадку рівна тривалості циклу формування  $T_{\text{ц.ф.}}$ ;  $\tau_5$  – тривалість ТО =  $\tau_{\text{т.о.}}$ ;  $a$  – кількість формувальних відсіків в касетній установці;  $K_0$  – коефіцієнт організації технологічного процесу (див. розрахунок ямних камер, с. 199).

Добова продуктивність установки,  $\text{м}^3/\text{добу}$ :

$$P_{\text{доб}} = O_k \cdot a \cdot V_b,$$

де  $V_b$  – об'єм бетону на один виріб,  $\text{м}^3$ .

Кількість касетних установок, що необхідна для забезпечення продуктивності лінії:

$$N_k = \frac{P_{\text{річ}}}{T_{\text{річ}} \cdot P_{\text{доб}} \cdot K_3},$$

де  $T_{\text{річ}}$  – річний фонд часу роботи обладнання, діб;  $K_3$  – коефіцієнт нерівномірності завантаження відсіків касетних установок ( $K_3 = 0,8...0,9$ ).



### ◆ Автоклави.

В основному конструктивний розрахунок автоклава може бути аналогічним до розрахунку ямних камер (*також див. п.3.15.5*).

Виконуючи розрахунок, необхідно прагнути до того, щоб коефіцієнт завантаження автоклава (коефіцієнт заповнення об'єму) був максимальним. Як правило, він складає:

$$K_3 \approx 0,35 \dots 0,45.$$

Використовуючи довідкові дані необхідно обрати тип автоклава (прохідний або тупиковий) а також автоклавні вагонетки.

Вибір типу і розміру автоклава залежить від габаритів виробів, технології їх виготовлення і продуктивності підприємства. Для виробів шириною до 1.6 м застосовують автоклави діаметром 2 м, а для виробів шириною до 2.2 м – діаметром 2.6 м і більше. При великих потужностях ліній виробництва найбільш ефективні прохідні автоклави, що забезпечують поточність виробництва.

Довжина автоклава повинна бути кратною довжині оброблюваних виробів, або довжині вагонеток, щоб максимально збільшити коефіцієнт заповнення автоклава.

Попередньо необхідно викреслити поперечні та повздовжні ескізи (*див. рис. 3.53*) укладки виробів на вагонетках, враховуючи габаритні розміри як вагонеток, так і самого автоклава.

Коефіцієнт заповнення автоклаву:

$$K_3 = \frac{\sum V_6}{V_a},$$

де  $V_a$  – внутрішній об'єм автоклаву:  $V_a = \frac{\pi d^2}{4} \cdot L$ .

Решта технологічних розрахунків – аналогічно до ямних камер (лише до  $T_{ц.ф.}$  необхідно додати тривалість визрівання виробів із газо- або пінобетону).

### ◆ Щілинні та тунельні камери.

Типові розміри для установок:

– щілинні камери: довжина – 60...127 м; висота – 0,7...1,2 м; ширина – 2,5...5 м.

– тунельні камери: 2...6-ярусні (висота одного ярусу – 0,65...0,85 м); довжина – 70...127 м.



Аналогічно до розрахунку установок періодичної дії перевіряється відповідність продуктивності поста ТО:

$$\Pi_{\text{год}} \approx \Pi_{\text{год}}^p = \frac{60}{T_{\text{ц.ф}}}, \quad \frac{60}{T_{\text{ц.ф}}} = r_{\text{ф}} - \text{ритм конвеєра формування.}$$

Геометричні розміри теплової установки залежать від її продуктивності та режиму ТО. При годинній продуктивності установки  $\Pi_{\text{год}}$  і тривалості теплової обробки в установці  $\tau_{\text{т.о.}}$ , кількість виробів в установці (на всіх ярусах) складе:

$$N_{\text{в}} = \Pi_{\text{год}} \cdot \tau_{\text{т.о.}}$$

Ритм конвеєра формування не повинен перевищувати ритму конвеєра ТО:

$$r_{\text{ф}} \leq r_{\text{т.о.}}$$

Для забезпечення даної умови можна передбачити роботу декількох формувальних конвеєрів (ліній) на 1 теплову установку або роботу однієї формувальної лінії на декілька ярусів однієї установки.

Ритм конвеєра ТО визначається за формулою:

$$r_{\text{т.о.}} = \frac{\tau_{\text{т.о.}}}{N'_{\text{в}}}, \text{ хв,}$$

де  $N'_{\text{в}}$  – кількість виробів в одній камері або на одному ярусі камери (для щілинних  $N'_{\text{в}} = N_{\text{в}}$ ).

Робоча довжина камери, м:

$$L = \frac{N_{\text{в}}}{N_{\text{я}}} \cdot (l_{\text{ф}} + l_1),$$

де  $l_{\text{ф}}$  – довжина форми-вагонетки, м (приймається рівною довжині виробу – для довгих виробів  $\approx 6\text{ м}$ ; для коротких виробів – декілька виробів по довжині вагонетки  $+0,05 \dots 0,1\text{ м}$ );  $l_1$  – зазор між формами-вагонетками по довжині:  $l_1 = 0,05 \dots 0,1\text{ м}$ ;  $N_{\text{я}}$  – кількість ярусів в тунельній камері ( $N_{\text{я}} = 1$  для щілинної камери).

Висота камери:

$$H = n_{\text{я}} \cdot (h_{\text{ф}} + a) - a + h_1 + h_2,$$

де  $h_{\text{ф}}$  – висота форми-вагонетки (приймається рівною висоті виробу  $+0,2 \dots 0,25\text{ м}$ );  $a$  – вільний проміжок між формами по висоті ( $0,1 \dots 0,2\text{ м}$ );  $h_1$  – відстань від підлоги камери до дна форми-вагонетки ( $0,12 \dots 0,25\text{ м}$ );  $h_2$  – відстань від верхньої площини виробів до перекриття камери ( $0,1 \dots 0,2\text{ м}$ ).

Ширина камери залежить від конструктивних особливостей поперечного перерізу камери (наприклад, від типу технологічного проходу





в камері, що необхідний для її обслуговування – див. рис. 3.38). У випадку влаштування проходу посередині ширина буде складати:

$$B = b_{\phi} + 2 \cdot b_1,$$

де  $b_{\phi}$  – ширина форми-вагонетки (приймається рівною ширині виробу +0,05...0,1 м);  $b_1$  – допустимий зазор між стінками камери і формою-вагонеткою (0,35...0,4 м).

Довжини зон в камері:

$$\text{– підігріву: } L_{\text{н}} = L \cdot \frac{\tau_{\text{н}}}{\tau_{\text{Т.О}}};$$

$$\text{– ізотермічної витримки } L_{\text{із}} = L \cdot \frac{\tau_{\text{із}}}{\tau_{\text{Т.О}}};$$

$$\text{– охолодження } L_{\text{ох}} = L \cdot \frac{\tau_{\text{ох}}}{\tau_{\text{Т.О}}};$$

де  $\tau_{\text{н}}$ ,  $\tau_{\text{із}}$ ,  $\tau_{\text{ох}}$  – відповідно тривалість нагріву, ізотермічної витримки та охолодження в загальному режимі теплової обробки.

Якщо однієї установки виявляється не достатньо для забезпечення годинної продуктивності  $\Pi_{\text{год}}$  (із прийнятими розмірами та кількістю ярусів), визначають продуктивність однієї установки, шт/год:

$$\Pi'_{\text{год}} = \frac{N_{\text{я}} \cdot N'_{\text{в}}}{\tau_{\text{Т.О}}},$$

а тоді визначають необхідну кількість теплових установок:

$$N_{\text{к}} = \frac{\Pi_{\text{год}}}{\Pi'_{\text{год}}}.$$

---

### ◆ Вертикальні камери.

---

За розрахунками продуктивності і ритму вимоги до вертикальних камер є аналогічними щодо тунельних (щілинних) камер.

Для вертикальних камер характерним є рівність тривалості нагріву і тривалості охолодження виробів:

$$\tau_{\text{н}} = \tau_{\text{ох}}.$$

Тоді кількість виробів в зонах нагріву і охолодження:

$$N_{\text{н}} = N_{\text{ох}} = \Pi_{\text{год}} \cdot \tau_{\text{н}}.$$

Кількість виробів в зоні ізотермічного прогріву:

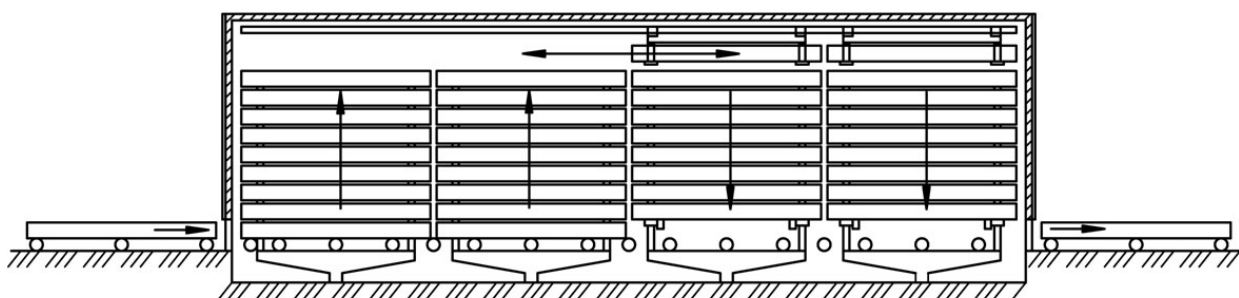
$$N_{\text{із}} = \Pi_{\text{год}} \cdot \tau_{\text{із}}.$$

Загальна кількість виробів в камері:



$$N_B = N_H + N_{i3} + N_{ox}.$$

Висоту камери приймають не вищою 9 м, або не більше 6...10 форм-вагонеток по висоті. Тому при кількості форм-вагонеток понад 20 (для крупнорозмірних виробів, кожен з яких повністю займає одну вагонетку, ця кількість рівна  $N_B$ ) необхідно приймати не менше 2-х потоків виробів в камері ( $n_{\Pi} = 2$ ) (рис. 7.3) з чотирма підйомниками-знижувачами.



**Рис. 7.3.** Повздовжній переріз вертикальної камери з двома потоками форм ( $n_{\Pi} = 2$ )

З умов повного завантаження камери і розміщення двох вагонеток – форм у верхній зоні на передавальному пристрої на кожному підйомнику повинно бути виробів:

$$S = \frac{N_B - 2n_B}{2 \cdot n_{\Pi} \cdot n_{ш}},$$

де  $N_B$  – кількість виробів у камері;  $n_B$  – кількість виробів у формі-вагонетці;  $n_{\Pi}$  – кількість потоків;  $n_{ш}$  – кількість штабелів, тобто виробів розташованих по висоті вагонетки.

Розміри зон нагріву, ізотермічної витримки і охолодження визначають виходячи з кількості виробів, що знаходяться в цих зонах і кількості потоків. Як правило, чітких меж ці зони не мають, що пояснюється конструктивними особливостями.

Внутрішні габарити камери:

*Довжина камери:*

$$L = 2 \cdot n_{\Pi} \cdot l_{\phi} + l_{\Pi} + 2 \cdot (n_{\Pi} - 1) \cdot l_{\Pi} + 2 \cdot l_2,$$

де  $l_n$  – відстань між потоками ( $l_n \approx 0,2$ м);  $l_2$  – відстань між вагонеткою і стінкою камери ( $l_2 = 0,3 \dots 0,35$ м);  $l_{\phi}$  – довжина форми-вагонетки.

*Ширина камери:*

$$B = 2 \cdot b_{\phi} + 2 \cdot e_1 + l_2^1,$$



де  $b_{\phi}$  – ширина вагонетки з формами;  $b_{\phi} = l_{\phi} + (0,01 \dots 0,02) \cdot 2$ ;

$e_1$  – допустимий зазор між стінками камери і вагонеткою з формами ( $e_1 = 0,4$  м);  $l_2$  – відстань між вагонетками на підйомнику ( $l_2 = 0,1 \dots 0,15$  м).

*Висота камери:*

$$H = (n_{\phi} + 1) \cdot h_{\phi} + n_{\phi} \cdot h_1 + h_2 + h_3,$$

де  $n_{\phi}$  – кількість вагонеток з формами, розташованих на підйомнику по висоті;  $h_{\phi}$  – висота форми з вагонеткою;  $h_{\phi} = h_{\phi} + 0,01 + h_{\text{ваг}}$ ;  $h_{\text{ваг}}$  – висота вагонетки;  $h_1$  – технологічний зазор по висоті між формами ( $h_1 = 0,1 \dots 0,2$  м);  $h_2$  – відстань від рівня підлоги до дна нижньої вагонетки  $h_2 = h_{\phi} + (0,1 \dots 0,15)$ ;  $h_3$  – відстань від верху останньої вагонетки з формами до верху камери (для розміщення передавального пристрою) ( $h_3 = 0,5 \dots 0,6$  м).

### 7.3.3. Розрахунки тепловиділення бетону

Орієнтовно тепловиділення 1 кг цементу після 28 діб твердіння в нормальних умовах може бути прийнято, кДж/кг цементу:

$$Q_{E_{28}} = 0,8 \dots 1,0 \cdot M,$$

де  $M$  – марка цементу.

В процесі тепловологісної обробки тепловиділення бетону на кожному етапі залежить від середньої температури бетону і тривалості процесу, і при постійному  $\frac{V}{\Omega}$  є функцією градусо-годин:

$$Q_E = f(\theta); \text{ де } \theta = t_{\text{сер.}} \cdot \tau_i.$$

При знаходженні в реальних теплових установках бетон потрапляє в умови нестационарного температурного режиму. Тому при розрахунках тепловиділення використовують розрахунково-графічну залежність з використанням критеріальних залежностей.

Для розрахунку процесів теплообміну при нестационарному температурному режимі використовуються критерії Біо та Фур'є.

Критерій Фур'є характеризує швидкість зміни температури матеріалу:

$$F_0 = \frac{a \cdot \tau}{R^2},$$

де  $\tau$  – тривалість нагріву (охолодження), год;  $R$  – характерний розмір виробу, м (в залежності від виду передачі тепла до виробу – односто-



ронній або двосторонній (відповідає повній товщині або половині товщини виробу));  $a$  – коефіцієнт температуропроводності, м<sup>2</sup>/год:

$$a = \frac{3,6 \cdot \lambda}{c \cdot \rho};$$

де  $\lambda$  – теплопровідність матеріалу, Вт/(м·°С);  $c$  – теплопровідність, кДж/(кг·°С);  $\rho$  – густина бетону, кг/м<sup>3</sup>.

Критерій Біо пов'язує фактори, що характеризують перенесення тепла:

$$B_i = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda},$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Для визначення  $Q_E$  існує номограма (див. рис. 3.17), яка пов'язує  $Q_E$  з маркою цементу, В/Ц і кількістю градусо-годин  $\theta$ . Таким чином, при заданих марці цементу і В/Ц необхідно знайти кількість градусо-годин для періодів нагріву і ізотермічної витримки.

Середня температура бетону в кінці періоду нагріву:

$$t_{\text{ср.к.}} = t_o + \frac{b \cdot R^2}{a} \cdot C_1,$$

де  $t_o$  – початкова температура бетонної суміші (бетону);  $b$  – швидкість підйому температури за період нагріву, °/год;  $a$  – коефіцієнт температуропроводності, м<sup>2</sup>/год;

$C_1 = f_1(F_o; B_i)$  – визначається графічно (див. рис. 2а [13] або рівняння 5.40 [10]).

Середня температура бетону на період нагріву:

$$t_{\text{ср}}^{\text{н}} = t_o + \frac{b \cdot R^2}{a} \cdot C_2,$$

де  $C_2 = f_2(F_o; B_i)$  – (див. рис. 2б [13] або рівняння 5.41 [10]).

Кількість градусо-годин, набраних бетоном за період нагріву:

$$\theta_{\text{н}} = \left( t_o + \frac{b \cdot R^2}{a} \cdot C_2 \right) \cdot \tau_{\text{н}},$$

де  $\tau_{\text{н}}$  – тривалість нагріву, год.

Кількість градусо-годин, набраних бетоном за період ізотермічної витримки:

$$\theta_{\text{із}} = t_{\text{із}} \cdot \tau_{\text{із}} - (t_{\text{із}} - t_{\text{ср.к.}}) \cdot \frac{R^2}{a} \cdot C_3,$$



де  $C_3 = f_3(F_0; V_i)$  – (див. рис. 2в [13] або рівняння 5.42 [10]).

Загальна кількість градусо-годин, набраних бетоном за період теплової обробки:

$$\theta = \theta_n + \theta_{iz}.$$

Тоді за номограмою (див. рис. 3.17) знаходять тепловиділення 1 кг цементу:  $Q_E$ .

Тепловиділення в перерахунку на 1 м<sup>3</sup> бетону можна знайти за виразом, кДж/м<sup>3</sup> бетону:

$$Q_{e.бет} = \Psi \cdot Q_E.$$

*Приклад розрахунку екзотермії бетону наведений в прикладі 15, розділ 4.*

### **7.3.4. Матеріальний баланс теплової установки**

Матеріальний баланс визначає рівність мас матеріалів, що надійшли на теплову обробку та тих, що пройшли її.

Для установок періодичної дії матеріальний баланс складають для всього матеріалу, що знаходиться в тепловій установці, а для установок неперервної дії – маси матеріалу та форм з умов годинної продуктивності установки.

Рівняння матеріального балансу в загальному вигляді:

$$G_1 = G_2 + G_{ВТР},$$

де  $G_1$  – надходження матеріалу в установку, кг/цикл (год.);  $G_2 + G_{ВТР}$  – витратна частина матеріального балансу із врахуванням втрат, кг/цикл (год.).

$$G_1 = G_c + G_{B1} + G_a + G_\phi + G_{огр},$$

де  $G_c$  – суха маса виробів:

$$G_c = G_\psi + G_k + G_n = V_B \cdot (\Psi + \Pi + \Sigma),$$

$V_B$  – об'єм бетону, м<sup>3</sup> в камері (для установок періодичної дії) або м<sup>3</sup>/год (для установок неперервної дії);  $\Psi$ ,  $\Pi$ ,  $\Sigma$  – витрати цементу, піску та щебеню (гравію, керамзитового гравію тощо) на 1 м<sup>3</sup> бетону, кг;  $G_{B1}$  – маса формувальної води в бетонній суміші:

$$G_{B1} = V_B \cdot B,$$

де  $B$  – витрати води на 1 м<sup>3</sup> бетону, кг;

$G_a$  – маса арматури:  $G_a = V_B \cdot A$ ,

де  $A$  – маса арматури в перерахунку на 1 м<sup>3</sup> бетону, кг/м<sup>3</sup>.

$G_\phi$  – маса форм або форм-вагонеток:





$$G_{\phi} = G_{\phi i} \cdot n,$$

де  $G_{\phi i}$  — маса  $i$ -ої форми;  $n$  — кількість форм.

Масу матеріалів огороження теплових установок  $G_{огр}$  розраховують тільки для установок періодичної дії (оскільки температура всіх зон установок неперервної дії є сталою протягом всього часу роботи):

$$G_{огр} = V_{огр} \cdot \rho_{огр},$$

де  $V_{огр}$  — об'єм матеріалів огороження (визначається як сумарний геометричний об'єм всіх конструкцій огороження теплової установки,  $\text{м}^3$ ;  $\rho_{огр}$  — середня густина матеріалів огороження (наприклад, бетону, сталі тощо),  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Витрата матеріалів (витратна частина балансу):

$$G_2 = G_c + G_{B2} + G_a + G_{\phi} + G_{огр}.$$

Величина  $G_{B2} < G_{B1}$  за рахунок зменшення маси води, що випарувалась у виробках.

Маса води, що залишилась у виробках:  $G_{B2} = G_{B1} - W$ ,

де  $W = \frac{\omega_1 - \omega_2}{100}$  — маса випаруваної води;  $\omega_1$  — початковий вміст води в бетоні,  $\omega_2$  — кінцевий вміст (після ТВО).

### **7.3.5. Тепловий баланс теплової установки**

На основі матеріального балансу складається тепловий баланс для періодів (зон) нагріву і ізотермічної витримки, а для ямних, тунельних і щілинних камер також і для періоду (зони) охолодження. Метою розрахунку теплового балансу є визначення питомих витрат теплоносія, а також витрат повітря на охолодження виробів.

Тепловий баланс установки, кДж/період (год.)

#### **Період нагріву.**

##### **I. Надходження тепла (прихідна частина).**

1. Тепло сухої частини бетону:

$$Q_{Ic} = (G_{ц} \cdot c_{ц} + G_{щ} \cdot c_{щ} + G_{п} \cdot c_{п}) \cdot t_1 = c_{с.с.} (G_{ц} + G_{щ} + G_{п}) \cdot t_1,$$

де  $t_1$  — початкова температура бетону;  $c_{с.с.}$  — теплоємність сухої частини бетону.

2. Тепло води формування:

$$Q_{Ib} = G_b \cdot c_b \cdot t_1.$$

3. Тепло арматури:



$$Q_{Ia} = G_a \cdot C_a \cdot t_1.$$

4. Тепло форм (форм-вагонеток):

$$Q_{I\phi} = G_\phi \cdot C_\phi \cdot t_1.$$

5. Тепло екзотермії цементу у виробках:

$$Q_{I.екз} = Q_{e.бет}^H \cdot V_б,$$

де  $V_б$  — об'єм бетону,  $m^3$  в камері (для установок періодичної дії) або  $m^3/год$  (для установок неперервної дії);  $Q_{e.бет}^H$  — екзотермія  $1 m^3$  бетону в період нагріву.

6. Тепло насиченої водяної пари, що надходить в установку:

$$Q_{I.п} = G_{I.п} \cdot i_{п},$$

де  $G_{I.п}$ ,  $i_{п}$  — відповідно маса і ентальпія пари, що надходить в установку;  $G_{I.п}$  є невідомою величиною балансу.

У випадку використання парових реєстрів визначається тепло, що віддається поверхнею парових реєстрів:

$$Q_{I.рег.} = 3,6 \cdot F_{рег.}^I \cdot k_{рег.} \cdot (t_{п} - t_{I-II}),$$

де  $F_{рег.}^I$  — сумарна площа реєстрів (яка є невідомою величиною),  $m^2$ ;  $k_{рег.}$  — коефіцієнт теплопередачі реєстрів,  $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$  (при теплопередачі через металеву стінку  $k_{рег.} = 1,67$ );  $t_{п}$  — температура поверхні реєстрів (залежить від тиску пари і складає  $115 \dots 150^\circ C$ );  $t_{I-II}$  — середня температура на період нагріву,  $^\circ C$ .

Сумарне надходження тепла за період нагріву, кДж:

$$\sum_1^6 Q_I^H = Q_{Ic} + \dots + G_{Iп} \cdot i_{п}.$$

## II. Витрати тепла (витратна частина).

1. Тепло сухої частини бетону:

$$Q_{IIc} = (G_{ц} \cdot c_{ц} + G_{щ} \cdot c_{щ} + G_{п} \cdot c_{п}) \cdot t_{II} = c_{с.с.} (G_{ц} + G_{щ} + G_{п}) \cdot t_{II},$$

де  $t_{II} = t_{i3}$  (температура ізотермічного прогріву).

2. Тепло на випаровування і перегрів частини формовочної води:

$$Q_{вип} = W \cdot (2550 + 1,97 \cdot t_{I-II})$$

де  $2550 [кДж/кг]$  — приблизне значення теплоти, затраченої на випаровування  $1 кг$  води;  $1,97 [кДж/кг]$  — теплоємність водяної пари;  $t_{I-II}$  — середня температура в установці на період нагріву та ізотермічної витримки.

3. Тепло води, що залишилось в бетоні до закінчення періоду нагріву:

$$Q_{IIв} = G_{в2} \cdot c_{в} \cdot t_{II},$$



де  $c_w$  – теплоємність води при температурі  $t_{II}$ .

4. Тепло арматури:

$$Q_{IIa} = G_a \cdot c_a \cdot t_{II}.$$

5. Тепло форм (форм-вагонеток):

$$Q_{IIф} = G_{ф} \cdot c_{ф} \cdot t_{II}.$$

6. Тепло вологого повітря, що заповнює вільний об'єм камери (або зони).

*Дана стаття балансу не застосовується для касетних установок і термоформ.*

$$Q_{II.v.o.} = G_{v.o.} \cdot i_{I-II} = V_{v.o.} \cdot \rho_{I-II} \cdot i_{I-II},$$

де  $V_{v.o.}$  – вільний об'єм камери (зони нагріву),  $m^3$ :

$$V_{v.o.} = V_I - \Sigma V_{ф.б.}$$

де  $V_I$  – геометричний об'єм камери (зони);  $V_I = L \cdot B \cdot H$ ;  $\Sigma V_{ф.б.}$  – сумарний об'єм форм (форм-вагонеток) і бетону в камері;  $\rho_{I-II}$ ,  $i_{I-II}$  – відповідно густина і ентальпія пароповітряної суміші при середній температурі нагріву.

7. Тепло матеріалів огороження до кінця періоду нагріву:

$$Q_{IIогр.} = \Sigma G_{огр.} \cdot c_{огр.} \cdot t_{IIогр.}$$

*Дана стаття балансу розраховується лише для установок періодичної дії.*

Розраховується окремо для наземної, підземної частини установки, підлоги, кришки і т.ін.

Також можливий розрахунок цієї статті як акумульованого тепла:

$$Q_{IIак.} = \Sigma [7,2 \cdot \lambda_i \cdot F_i \cdot (t_{I-II} - t_I) \cdot \sqrt{\frac{\tau_I}{a_i \cdot \pi}}],$$

де  $F_i$ ,  $\lambda_i$ ,  $a_i$  – відповідно площа поверхні елементів огороження,  $m^2$ , їх коефіцієнти теплопровідності і температуропроводності.

8. Втрати тепла через огороження установки в навколишнє середовище до кінця періоду нагріву:

$$Q_{н.с.}^I = 3,6 \tau_I \cdot (t_{I-II} - t_I) \cdot \Sigma (F_i \cdot k_i),$$

де  $k_i$  – коефіцієнт теплопередачі [ $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$ ]:

$$k_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

де  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі відповідно від внутрішнього середовища до стінки і від стінки до навколишнього середовища.



**9. Тепло, що виноситься конденсатом:**

$$Q_{\text{конд}}^I = G_{\text{конд}} \cdot i_{\text{конд}},$$

де  $G_{\text{конд}} = 0,8 \dots 0,9 \cdot G_n^I$ ;  $i_{\text{конд}} = 4,19 \cdot t_{\text{I-II}}$  – ентальпія конденсату, кДж/кг.

**10. Втрата тепла через нещільності камери або через завантажувальні отвори:**

$$Q_{\text{нещ}}^I = 0,1 \dots 0,2 \sum_1^9 Q_{\text{витр}},$$

де коефіцієнт в формулі: 0,05 – для термоформ, касет; 0,1 – для ямних і вертикальних камер; 0,2 – для тунельних і щілинних.

Після підрахування усіх статей прирівнюють сумарні надходження та втрати тепла:

$$\Sigma Q_{\text{над}} = \Sigma Q_{\text{витр}}.$$

Звідси знаходять невідому величину  $G_n^I$  – витрати пари на 1 год. (період) роботи установки або на 1 м<sup>3</sup> бетону.

### **Період ізотермічної витримки.**

#### **I. Надходження тепла (прихідна частина).**

В прихідній частині враховуються всі надходження тепла після періоду нагріву, тобто майже всі статті цієї частини відповідають аналогічним статтям з витратної частини періоду нагріву:

$$Q_{\text{Ic}}^{\text{із}} = Q_{\text{IIc}}^{\text{н}}, \quad Q_{\text{Iв}}^{\text{із}} = Q_{\text{IIв}}^{\text{н}} \text{ і т.д.}$$

Для установок періодичної дії також враховується тепло огорожень після періоду нагріву  $Q_{\text{Iогр}}^{\text{із}} = Q_{\text{IIогр}}^{\text{н}}$ .

Тепло екзотермії бетону в період ізотермічної витримки:

$$Q_{\text{I.екз}} = Q_{\text{е.бет}}^{\text{із}} \cdot V_{\text{б}},$$

де  $Q_{\text{е.бет}}^{\text{із}}$  – екзотермія 1 м<sup>3</sup> бетону в період нагріву.

Тепло насиченої водяної пари, що надходить в установку:

$$Q_{\text{I.п}} = G_{\text{I.п}}^{\text{із}} \cdot i_{\text{п}},$$

де  $G_{\text{I.п}}^{\text{із}}$ ,  $i_{\text{п}}$  – відповідно маса і ентальпія пари, що надходить в установку в період (зону) ізотермічної витримки;  $G_{\text{I.п}}^{\text{із}}$  – невідома величина.

Сумарне надходження тепла за період ізотермічної витримки:

$$\sum_1^n Q_i^{\text{із}} = Q_{\text{Ic}} + \dots + G_{\text{I.п}}^{\text{із}} \cdot i_{\text{п}}, \text{ кДж.}$$



## II. Витрати тепла (витратна частина).

Основні статті витрат переходять з прихідної частини (суха частина бетону, вода, арматура, форми) – оскільки нагрівання чи охолодження в цей період не відбувається.

Оскільки випаровування вологи в період ізотермічної витримки незначне, то ним можна знехтувати а, отже,  $Q_{\text{вип}}^{\text{із}} = 0$ .

Решта статей – аналогічні, необхідно тільки враховувати зміну температури  $t_{I-II}$  на  $t_{II}$  ( $t_{i3}$ ) та інших параметрів, що залежать від температури ( $\rho$ ,  $i$ ,  $a_i$ ,  $k_i$  тощо).

Після підрахування усіх статей прирівнюють сумарні надходження та втрати тепла:

$$\sum Q_{\text{над}}^{\text{із}} = \sum Q_{\text{витр}}^{\text{із}}.$$

Звідси знаходять невідому величину  $G_{I,II}^{\text{із}}$  – витрати пари на 1 год. (період) роботи установки або на 1 м<sup>3</sup> бетону.

### **Період охолодження.**

Розрахунки проводяться лише для установок, в яких відбувається примусове охолодження виробів.

Принцип складання балансу для періоду охолодження відповідає двом попереднім періодам, тільки замість визначення кількості тепла, яке необхідно подати у вигляді пари, для даного періоду визначають кількість повітря, що подається в установку або зону установки для відбирання певної кількості тепла.

В статтях надходжень тепла враховують тепло від нагрітої сухої частини бетону  $Q_{Ic}^{\text{ox}}$ , від води, що залишилась після періоду ізотермічної витримки  $Q_{Ib}^{\text{ox}}$ , від нагрітої арматури, форм та конструкцій огороження  $Q_{Ia}^{\text{ox}}$ ,  $Q_{If}^{\text{ox}}$ ,  $Q_{Iогр}^{\text{ox}}$ . Дані статті рівні аналогічним статтям витрат в періоді ізотермічної витримки.

В статтях витрат необхідно врахувати зазначені вище 5 статей. При цьому в усіх розрахунках використовується  $t_{III}$  – кінцева температура бетону (до якої його необхідно охолодити). Для  $Q_{Iогр}^{\text{ox}}$  температура  $t_{III}$  може бути на декілька градусів вищою, що пояснюється тепловою інерційністю конструкцій огороження.

Також потрібно врахувати:

- випаровування вологи  $Q_{\text{вип}}^{\text{ox}}$  ;
- втрати тепла в навколишнє середовище:





$$Q_{н.с.}^{ox} = 3,6\tau_{ox} \cdot (t_{II-III} - t_{н.с.}) \cdot \Sigma(F_i \cdot k_i);$$

– втрата тепла через нещільності камери або через завантажувальні отвори (див. ст.10 витрат періоду нагріву);

– тепло, що забирається повітрям  $Q_{пов}^{ox}$  – *невідомо величина*.

Після складання балансу визначають  $Q_{пов}^{ox}$  [кДж/період (год)]. При цьому ця величина повинна бути від'ємною.

Знаючи теплоємність та густину повітря можна знайти його витрату:

$$V_0 = \frac{Q_{пов}}{[C_{пов} \cdot (t_{III} - t_{II}) \cdot \rho_{пов}]} \text{ м}^3 / \text{період (год)},$$

або годинні витрати:  $V_{год} = \frac{V_0}{\tau_{ox}}$ .

Результати розрахунку зводять у звідну таблицю витрат пари та тепла для аналізу процесу теплової обробки (табл. 7.13).

Таблиця 7.13

Витрати тепла і пари в тепловій установці

Витрати	Для періоду нагріву	Для періоду ізот. витр.	Для періоду охолодження	Для повного циклу ТО в 1 камері	Для n камер
Витрати пари, кг/год. кг/м <sup>3</sup> бет.					
Витрати тепла, кДж/год. кДж/м <sup>3</sup> бет.					

### 7.3.6. Гідравлічний розрахунок

Метою проведення гідравлічного розрахунку є складання схеми паропостачання теплової установки та визначення сумарних втрат тиску при проходженні пари по паровому тракту. За даними гідравлічного та теплотехнічного розрахунків по величинам необхідного тиску



пари та її годинної витрати підбирають тип котлоагрегату та проводять його розрахунок.

Оскільки система паропостачання камер одна для періодів нагріву і ізотермічної витримки, а витрата пари в період нагріву вища ніж в період витримки, то розрахунок системи паропостачання для установок періодичної дії ведуть по періоду нагріву (тобто по витраті пари  $G_H$ ), а для установок неперервної дії – по загальній витраті пари  $G_H + G_{I3}$ .

Втрати тиску при транспортуванні пари поділяють на лінійні та місцеві.

Лінійні втрати, тобто втрати тиску на тертя при проходженні пари по трубах:

$$\Delta P_{mp} = \beta \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2},$$

де  $\beta$  – коефіцієнт тертя одиниці довжини паропроводу або коефіцієнт гідравлічного тертя:

$$\beta = 0,11 \left( \frac{k}{d} \right)^{0,25},$$

де  $k$  – коефіцієнт шорсткості труби:  $k = 0,1 \dots 0,2$  – для нових сталевих труб;  $k = 0,8 \dots 1,0$  – для чавунних труб;  $k = 2,5 \dots 3,0$  – для кородованих труб;  $d$  – діаметр трубопроводу, м:

$$d = \sqrt{\frac{4G_n}{3600 \cdot v \cdot \rho \cdot \pi}},$$

де  $G_n$  – витрата при на розрахунковій ділянці, кг/год;  $v$  – швидкість пари, м/с:

– для магістральних паропроводів  $v = 30 \dots 40$  м/с;

– для паропроводів біля входу у камеру  $v = 15 \dots 20$  м/с.

$\rho$  – середня густина пари при відповідній температурі або ентальпії, кг/м<sup>3</sup>;

$l$  – довжина розрахункової ділянки, м.

Місцеві втрати тиску:

$$\Delta P_M = \frac{\zeta \cdot v^2 \cdot \rho}{2},$$

де  $\zeta$  – коефіцієнт місцевого опору:

$$\zeta = \frac{l_e}{76,4 \cdot d^{1,25}}, \text{ – для опорів на прямому повороті та вентилях,}$$



де  $l_e$  – еквівалентна довжина паропроводу, лінійна втрата тиску на якій відповідає місцевій втраті,  $m$ ;  $d$  – діаметр ділянки,  $m$ .

Формули для визначення еквівалентної довжини паропроводу наведені в спеціальній літературі (для повороту і вентилію – в [13])

Втрати тиску на розводку пари по камері  $\Delta P_p$  а також місцеві опори на вході у камеру можна приймати в % від  $\Sigma(\Delta P_{тр} + \Delta P_m)$ :

- для касет і термоформ пакетувальників: 5%
- для автоклавів і термоформ-труб: 5...10%
- для ямних і вертикальних камер: 10...15%
- для тунельних і щілинних камер: 15...20%

Загальний тиск пари, який необхідно мати на початку магістралі буде становити:

$$P_{заг} = \sum_{i=1}^n (\Delta P_{тр} + \Delta P_m) + \Delta P_p + P_n,$$

де  $\Delta P_p$  – втрати тиску на розводку пари по камері;  $P_n$  – надлишковий тиск пари, що подається у камеру.

Значення надлишкового тиску можна приймати:

$P_n = 0,05 \dots 0,1$  МПа – для всіх установок;  $P_n \approx 1$  МПа – для автоклавів.

В кінці розрахунку необхідно підібрати тип котлоагрегату на основі значень  $P_{заг}$  і годинної витрати пари на початку магістрального паропроводу.

*Приклад гідравлічного розрахунку теплової установки наведений в [13].*



## 8. ТЕМАТИКА ТА ЗАВДАННЯ НА САМОСТІЙНУ РОБОТУ

---

### 8.1. Загальні рекомендації до самостійної роботи

Значна частину часу, відведеного навчальним планом на вивчення дисципліни "Основи термодинаміки, теплотехніка та теплотехнічне обладнання", використовується для виконання самостійної роботи. Повноцінне засвоєння теоретичного матеріалу неможливе без його обговорення та розв'язування задач на практичних заняттях, тому окремі теми розглядаються на передбачених планом аудиторних практичних заняттях. В той же час, у зв'язку з недостатністю аудиторного часу для повного охоплення всіх тем дисципліни, самостійна робота набуває особливо важливого значення.

Самостійна робота включає такі види діяльності:

- 1) поглиблене вивчення програмного матеріалу, викладеного на лекційних заняттях, за конспектами лекцій, підручниками та посібниками;
- 2) самостійне вивчення за підручниками та навчальними посібниками розділів програми, не включених в лекційний курс;
- 3) самостійне розв'язання задач за відповідними розділами курсу;
- 4) підготовка реферату на певну тему серед запропонованих або вибрану самостійно і погоджену з викладачем.

Перш ніж приступати до самостійного вирішення задач по кожній з тем, необхідно глибоко засвоїти відомості теоретичного курсу та зрозуміти зв'язок з іншими темами дисципліни.

З наведених видів самостійної роботи дві останні підлягають оцінюванню в балах і вимагають відповідної форми звітності. Особливо-сті цих видів роботи та рекомендовані завдання наведені далі.

### 8.2. Завдання для самостійного розв'язання задач\*

З метою додаткового опрацювання та поглиблення знань щодо окремих тем дисципліни а також підвищення власного рейтингу студентам пропонується самостійне розв'язання задач. Даний вид навча-

---

\* В даному пункті викладено лише частину із можливих задач. Інші види задач можна знайти в навчальному посібнику [10].



льної роботи передбачає нарахування додаткової кількості балів до одержаної суми за курс (див. розділ 2 інтерактивного комплексу).

Звіт про виконання даної самостійної роботи подається у вигляді конспекту (рукописного або електронного) у відповідності із об'ємом завдань, запропонованих викладачем по кожній темі або визначений самостійно самим студентом. Сумарна кількість завдань (задач) не повинна бути меншою 10 і охоплювати максимально можливу кількість тем.

Представлення звіту по самостійно розв'язаним задачам здійснюється в останній тиждень семестру. Максимальна кількість балів за даний вид роботи – 10.

### **8.2.1. Процеси сушіння, випалу і плавлення матеріалів**

1. Визначити тиск газів у печі висотою 2 м, якщо рівень нульового тиску розташований на споді печі. Температура газів у пічному просторі  $800^{\circ}\text{C}$ , їх густина  $1,3 \text{ кг/м}^3$ , температура навколишнього середовища  $20^{\circ}\text{C}$ , густина  $1,293 \text{ кг/м}^3$ .

*Відповідь:  $P = 17 \text{ Па}$ .*

2. Визначити втрати тиску при проходженні продуктів горіння крізь цегляну садку тунельної печі довжиною 60 м із живим перерізом, який складає 50% загального перерізу печі  $3 \times 1,2 \text{ м}$ . Вихід продуктів згорання  $V_0$  складає  $2,6 \text{ м}^3/\text{с}$ . Середня температура в зоні  $800^{\circ}\text{C}$ , густина димових газів  $1,28 \text{ кг/м}^3$ .

*Відповідь:  $120 \text{ Па}$ .*

3. Визначити середню температуру в цегляній димовій трубі висотою 40 м, якщо в основі вона складає  $400^{\circ}\text{C}$ .

*Відповідь:  $370^{\circ}\text{C}$ .*

4. Розрахувати аеродинамічний опір обертової печі із ланцюговою завісою, якщо швидкість газів в холодному кінці печі складає  $7,5 \text{ м/с}$ , густина газів  $1,14 \text{ кг/м}^3$  за нормальних умов. Температура газів  $200^{\circ}\text{C}$ , ланцюги навішені гірляндами, діаметр печі в світлі в зоні ланцюгової завіси дорівнює  $4,3 \text{ м}$ , довжина завіси складає  $45 \text{ м}$ , щільність завіси 6 (відношення  $S_{\text{л}} : S_{\text{фут}}$ ).

*Відповідь:  $372 \text{ Па}$ .*





5. Температура повітря, яке виходить із камери сушіння складає  $60^{\circ}\text{C}$ , а температура мокрого термометра  $50^{\circ}\text{C}$ . Визначити відносну вологість, вологовміст, тепловміст повітря після камери.

*Відповідь:  $\varphi = 60\%$ ,  $d = 84 \text{ г/кг}$ ,  $I = 280,8 \text{ кДж/кг с.п.}$*

6. Розрахувати висоту і нижній діаметр димової труби, яка виділяє із теплової установки димові газу об'ємом  $4,2 \text{ м}^3/\text{с}$  із середньою температурою  $260^{\circ}\text{C}$ . Розрідження, яке створює труба, повинно скласти  $450 \text{ Па}$ . Температура навколишнього повітря  $20^{\circ}\text{C}$ , густина димових газів  $1,3 \text{ кг/м}^3$ , швидкість газів на виході  $W_{\text{в}} = 3 \text{ м/с}$ .

*Відповідь: висота -  $86,4 \text{ м}$ , нижній діаметр -  $2 \text{ м}$ .*

7. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від димових газів до ланцюгової завіси барабанної сушарки, якщо середня швидкість газів  $W = 9,2 \text{ м/с}$ , кінематична в'язкість  $\nu = 95 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Ланцюги мають діаметр  $d = 25 \text{ мм}$  в перерізі. Теплопровідність газів  $\lambda = 0,07 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$ . Теплообмін можна описати залежністю  $\text{Nu} = 0,45 \cdot \text{Re}^{0,45}$ .

*Відповідь:  $93,2 \text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ .*

8. Стіна печі складається із футеровки (хромомангезит)  $b_1 = 200 \text{ мм}$ , шару теплоізоляції (шамот легковаговий)  $b_2 = 65 \text{ мм}$ , кожуха сталевого  $b_3 = 5 \text{ мм}$ . Для цих матеріалів коефіцієнт теплопровідності складає відповідно:  $\lambda_1 = 1,63 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ;  $\lambda_2 = 0,54 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ;  $\lambda_3 = 47 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ . Коефіцієнт тепловіддачі від стінки в навколишнє середовище складає  $\alpha_1 = 20 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ . Температура поверхні зони випалу складає  $1350^{\circ}\text{C}$ , температура повітря  $20^{\circ}\text{C}$ . Коефіцієнт тепловіддачі від гарячої зони печі до футеровки  $\alpha_2 = 50 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ . Визначити тепловий потік крізь стінку.

*Відповідь:  $4243 \text{ Вт/м}^2$ .*

9. В теплообмінному апараті температури гріючого агента становлять:  $t_{\text{поч}}^1 = 300^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{кін}}^1 = 200^{\circ}\text{C}$ , а теплоносія, який нагрівається – відповідно  $t_{\text{поч}}^2 = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{кін}}^2 = 175^{\circ}\text{C}$ . Визначити середню різницю температур між гріючим і сприймаючим теплоносіями у випадках прямого і протитоку.

*Відповідь: протіток –  $104^{\circ}\text{C}$ ; прямоток –  $150^{\circ}\text{C}$ .*

10. Визначити діаметр топки та дійсне газове напруження за наступних умов. За годину в топці повинно згоряти  $50 \text{ кг}$  умовного палива. Теплове напруження не повинно перевищувати  $200 \text{ тис. кДж/м}^3\cdot\text{год}$ .



Висота приймається 1.5 м. Яке газове напруження буде мати топка ( $\text{м}^3/\text{с}\cdot\text{м}^2$ ), якщо вихід димових газів з 1 кг натурального палива ( $Q_p^H = 20$  тис. кДж/кг) складає близько  $10 \text{ м}^3/\text{кг}$ , а температура димових газів  $1400^\circ\text{C}$ .

*Відповідь:  $d = 2.5 \text{ м}; Rt = 0,257 \text{ м}^3/\text{с}\cdot\text{м}^2$ .*

### **8.2.2. Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону**

1. Призначити режим ТО плити перекриття товщиною 35 см із важкого бетону класу В30 у ямній камері. Рухливість суміші 2...4 см; початкова міцність бетону 0.4 МПа; початкова температура бетонної суміші  $15^\circ\text{C}$ , температура навколишнього середовища  $-10^\circ\text{C}$ .

*Відповідь:  $2+2.6+5+2.5 \text{ год}$ .*

2. Призначити режим ТО стінових блоків товщиною 12 см із керамзитобетону класу В5 у ямній камері. Жорсткість суміші 20 с. ТО проводиться паровими реєстрами при  $t_{iz}=100^\circ\text{C}$ . Початкова температура бетону  $20^\circ\text{C}$ , температура навколишнього середовища  $0^\circ\text{C}$ .

*Відповідь:  $0.5+1.6+6+1.5 \text{ год}$ .*

3. Визначити необхідну кількість ямних камер для ТО плит перекриття ( $V_6=1.2 \text{ м}^3$ ), якщо відомо, що роботу поста ТО забезпечує 3 формувальних конвеєра із  $T_{ц.ф} = 25$  хв. Кількість виробів в камері 8. Річний фонд часу роботи обладнання 3129 год. Тривалість ТО 8 год. Коефіцієнти: завантаження камери  $K_3=0.5$ ; організації  $K_0=0.65$ ; додаткових робіт  $K_d=0.94$ ; внутрішньозмінного використання робочого часу  $K_{вз}=0.77$ .

*Відповідь:  $N_k = 7.3 \approx 8 \text{ шт}$ .*

4. Стінові панелі розміром  $3.0 \times 2.8 \times 0.3$  м у формі з габаритами  $3.2 \times 2.95 \times 0.5$  м піддаються ТО у ямній камері. Визначити розміри і коефіцієнт завантаження камери при одночасній обробці 8 виробів. Яка кількість теплових установок необхідна, якщо продуктивність однієї камери  $\Pi_{год} = 5 \text{ м}^3/\text{год}$ , а тривалість циклу формування одного виробу 20 хв ?

*Відповідь:  $K_3=0.375$ ; 2 камери.*

5. Визначити геометричні розміри щілинної камери та ритм теплової обробки бетонних виробів. Загальна продуктивність лінії 8 виро-



бів/год. Тривалість ТО:  $3+6+2 = 11$  год. Розміри форми-вагонетки з виробом:  $3.2 \times 2.5 \times 0.55$  м. За умовами виробництва робоча довжина камери не повинна перевищувати 100 м.

*Відповідь: 3 паралельно працюючі камери;  $L = 99$  м;  
 $H = 0.9$  м;  $V = 3.3$  м.  $r_{m.o.} = 0.37$  год.*

6. Встановити значення ентальпії пари на початку паропроводу, якщо лінійні теплові втрати становлять 85 Вт/м, а годинна витрата пари по паропроводу 900 кг/год. Довжина паропроводу 90 м. Ентальпія пари на вході у камеру 2720 кДж/кг.

*Відповідь: 2750 кДж/кг.*

7. Визначити яка кількість теплоти виділиться при пропарюванні у ямній камері з/б плити товщиною 20 см ( $V_6 = 1.67$  м<sup>3</sup>) на портландцементі М 400 в період нагріву, якщо відомо: витрати цементу на 1м<sup>3</sup> бетону 400 кг;  $V/\Omega = 0.5$ ; початкова температура бетонної суміші 40°C; швидкість нагріву 25°C/год; тривалість нагріву 3 год. Коефіцієнт температуропровідності бетону  $a = 0.00357$  м<sup>2</sup>/год.

Коефіцієнт  $C_2 = f_2(F_0; V_i) = 0.17$ .

*Відповідь:  $104 \cdot 10^3$  кДж/кг.*

8. Яку кількість пари з ентальпією  $i_{п} = 2670$  кДж/кг необхідно подати у ямну камеру на нагрів металевих форм до температури 90°C якщо відомо, що годинна продуктивність установки  $\Pi_{год} = 2.1$  м<sup>3</sup>/год; питома металоемність форми  $g = 1.3$  т/м<sup>3</sup>; загальна тривалість ТО – 8 год; початкова температура форм 25°C; теплоємність сталі  $c_{ст} = 0.48$  кДж/(кг·°C). Втратами тепла з конденсатом можна знехтувати.

*Відповідь: 255 кг.*

9. Огородження ямної пропарювальної камери виконане у вигляді трьохшарової стінки: внутрішній шар – керамзитобетон ( $\delta = 10$  см); проміжний шар – мінераловатні плити ( $\delta = 6$  см); зовнішній шар – залізобетон ( $\delta = 12$  см). Коефіцієнт тепловіддачі від внутрішнього середовища камери до стінки  $\alpha_1 = 40$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C); від стінки в навколишнє середовище  $\alpha_2 = 6$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C). Температура навколишнього середовища 20°C, ізотермічного прогріву 80°C. Визначити питомі втрати тепла через огороження в навколишнє середовище.

*Відповідь:  $147,5$  кДж/м<sup>2</sup>·год.*



10. Паропостачання двох тунельних камер здійснюється загальним магістральним паропроводом із сталевих труб довжиною 15 м. Середня температура насиченої пари  $180^{\circ}\text{C}$ . Продуктивність однієї камери  $4.6 \text{ м}^3 \text{ бет./год}$ , питомі витрати пари  $250 \text{ кг/м}^3$  при швидкості руху 40 м/с. Визначити втрати тиску по довжині паропроводу.

*Відповідь: 779 кПа.*

### **8.3. Теми рефератів для самостійної роботи**

Реферат з дисципліни “Основи термодинаміки, теплотехніка та теплотехнічне обладнання” є додатковим видом самостійної роботи студента з даного курсу, яка виконується за його бажанням.

Тему реферату студент обирає із запропонованого переліку або формулює сам, попередньо погодивши її з викладачем.

Розкриття теми реферату повинно бути ґрунтовним і по суті, наповнене критичним аналізом стану питання та не повинно містити тривіальних і загальновідомих положень і даних.

При підготовці реферату необхідно використовувати сучасні інформаційні джерела (періодичні видання, підручники, посібники, монографії, ресурси Інтернету), посилання на які є обов'язковими.

Бажаним є використання ілюстративного матеріалу (схеми, рисунки, фото та ін.).

Реферат оформляється у вигляді зброшурованого звіту на стандартних аркушах формату А4 обсягом 10...15 сторінок основного тексту а також переліку використаної літератури та інформаційних джерел. Зміст роботи наводиться з однієї сторони аркушів рукописним способом або за допомогою друкарських пристроїв. Бажаним є виконання реферату комп'ютерним способом з обов'язковим представленням тексту роботи на електронному носії.

На титульній сторінці необхідно вказати назву вищого навчального закладу, кафедру, тему реферату, прізвище, ім'я та по батькові студента, посаду, прізвище та ініціали викладача, що перевіряє та зараховує реферат.

Термін здачі реферату – не пізніше, ніж через 1 місяць з моменту призначення та затвердження теми викладачем (і не пізніше, ніж за тиждень до закінчення навчального семестру).

Максимальна кількість балів, якою оцінюється якість написання реферату – 10 з кратністю 1 бал.



Отримана кількість балів повинна узгоджуватись із загальними принципами оцінювання і нарахування балів за весь курс (див. розділ 2 інтерактивного комплексу).

У випадках невідповідності змісту реферату його темі а також явного плагіату (повторного використання готових, раніше виконаних робіт, в т.ч. розміщених в Інтернеті) представлений реферат не приймається до захисту і оцінка за його виконання не ставиться.

### **Можливі варіанти тем реферату:**

1. Принципові схеми роботи промислових печей.
2. Будова та принцип роботи сушарки "киплячого шару".
3. Сучасні сушильні установки для суспензій в керамічній промисловості.
4. Особливості та показники роботи скловарильних установок.
5. Установки для випалу штучних заповнювачів бетону
6. Історія розвитку установок для тепловологісної обробки бетону.
7. Геліотермальна обробка бетону. Особливості процесу та варіанти теплових установок.
8. Особливості та установки повітряно-сухого прогріву бетону.
9. Розрахунок витрат на теплову обробку бетону. Порівняння варіантів.
10. Сучасні котлоагрегати на заводах збірного залізобетону.
11. Нетрадиційні види енергетики. Перспективи використання.
12. Теплова обробка бетону методом електроіндукції.
13. Ямні камери тепловологісної обробки. Сучасний стан і перспективи вдосконалення.
14. Теплова обробка залізобетонних виробів в рідкому середовищі. Переваги та недоліки.
15. Принципи роботи теплових та атомних електричних станцій.
16. Застосування продуктів згорання газу для тепловологісної обробки бетону.
17. Установки для розморожування і розігріву заповнювачів для бетону.
18. Схеми автоматичного контролю і регулювання процесу ТВО в ямних пропарювальних камерах.
19. Розробка завдання на автоматизацію щільної пропарювальної камери.
20. Особливості теплообміну та масообміну при ТВО в установках неперервної дії.





## 9. ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ СЛОВНИК

### А

**Автоклавна обробка** – спосіб тепловологісної обробки матеріалів в середовищі чистої насиченої пари, при високих температурах і тиску, вищому за атмосферний. Здійснюється в спеціальних установках – *автоклавах*.

**Автоклав** – теплова установка (апарат) для проведення *автоклавної обробки*.

**Агломерація** – метод омонолічуванням в конгломерат гранул, виготовлених обкочуванням порошкової сировинної суміші або дробленого щебеню з глинистих порід. Використовується при виготовленні аглопориту.

### Б

**Бетон** – композиційний матеріал, що складається із цементного каменю, заповнювача і контактного шару між ними

### В

**Вакуумування** – процес зниження тиску в автоклаві нижче атмосферного. Застосовується в період охолодження з метою зниження вологості виробів та їх рівномірного охолодження без розвитку деструктивних процесів.

**Відносна міцність бетону** – значення міцності бетону після тепловологісної обробки виражене у відсотках від марочної міцності.

### Г

**Гідравлічний затвор (водяний затвор)** – пристрій, що знаходиться в місці з'єднання конструктивних елементів пропарювальної камери, призначений для її герметизації.

**Геліотермальна обробка** – це спосіб теплової обробки бетону безпосередньо дією на нього потоку прямої і дифузійної сонячної радіації через світлопрозоре і сонцесприймаюче покриття, яке запобігає зневодненню твердніючого бетону.

### Е

**Ежектор паровий** – апарат, що використовує енергію струменя для відсмоктування пари або газу із замкнутого простору. В установках тепловологісної обробки використовується для створення ефективних систем паропостачання і циркуляції середовища.



**Екзотермія бетону** – явище тепловиділення бетону в результаті хімічних реакцій твердіння цементної складової, що проходять з екзотермічним ефектом.

**Електродне прогрівання бетону** – метод теплової обробки, що ґрунтується на пропусканні електричного струму через бетон або бетонну суміш за допомогою електродів.

**Електрообігрівання** – метод теплової обробки, що здійснюється шляхом подачі теплоти до поверхні бетону від джерел перетворення електричної енергії в теплову – нагрівачів інфрачервоного випромінювання або низькотемпературних нагрівачів.

**Економічна товщина** – товщина ізоляції огорожувальної конструкції, що відповідає найменшій сумарній вартості експлуатації.

## І

**Індукційне прогрівання** – метод термообробки бетону заснований на використанні магнітної складової змінного електромагнітного поля для нагрівання сталі внаслідок теплової дії електричного струму, що наводиться електромагнітною індукцією.

## К

**Кондуктивне (контактне) прогрівання** – спосіб теплової обробки виробів (через роздільну металеву стінку), що здійснюються в індивідуальних термоформах або пакетах термоформ.

**Коефіцієнт завантаження (заповнення) камери** – показник, що характеризує відношення сумарного об'єму бетону виробів в камері до її внутрішнього об'єму.

## М

**Модуль поверхні виробу** – відношення площі поверхні виробу до його об'єму. Застосовується поряд із поняттям *модуль відкритої поверхні*. Характеризує масивність конструкції (чим менший модуль поверхні, тим конструкція масивніша). Є важливим показником від якого, зокрема, залежить призначення режиму тепловологісної обробки залізобетонних конструкцій.

## Н

**Насичена водяна пара** – пара, що знаходиться у термодинамічній рівновазі з водою, з якої вона отримана. При зміні температури рідини рівновага порушується, що приводить до відповідної зміни густини і тиску насиченої пари.

- **волога насичена пара** – насичена пара, що містить дрібні краплі рідини;



- **суха насичена пара** – пара, що отримується при випаровуванні всієї рідини і не містить частинок рідкої фази.
- **перегріта пара** – це пара, температура якої вища ніж температура насиченої пари при тому ж тиску.

## О

**Об'ємне напруження сушильної установки** – об'єм вологи, що випаровується з матеріалу, за одиницю часу з одиниці об'єму установки.

## П

**Пропарювання** – тепловологісна обробка бетону пароповітряною сумішшю або середовищі чистої насиченої пари.

**Попереднє витримування бетону** – витримування при температурі навколишнього середовища, під час якого бетон набуває початкової міцності, необхідної для сприйняття теплового впливу без порушення структури.

**Полігональна камера** – установка неперервної дії, призначена для тепловологісної обробки бетонних виробів, що представляє собою модифікацію щілинної камери із покращеним профілем.

**Плавлення** – це процес переходу твердої речовини в рідкий стан (розплав), що супроводжується поглинанням теплоти.

**Питома теплота плавлення** – теплота, що витрачається на перехід одиниці маси речовини з твердого стану в рідкий при температурі плавлення

## Р

**Режим тепловологісної обробки** – сукупність умов навколишнього середовища (температура, вологість і тиск), що діють на виріб протягом певного часу і обумовлюють оптимальну для даного виробу швидкість процесу твердіння.

- **ефективний режим** – режим теплової обробки, що дозволяє одержувати бетон заданої міцності без істотних порушень його структури при мінімальних питомих витратах в'язучого і теплової енергії;
- **жорсткий режим** – режим, якому відповідають жорсткі умови структуроутворення бетону: коротке попереднє витримування відформованих виробів, швидкий підйом температури, висока температура ізотермічного прогріву, недостатньо вологе середовище, негайна розпалубка тощо;
- **м'який режим** – поєднує тривале попереднє витримування, повільний підйом температури, низьку температуру ізотермічного прогріву, вологе середовище і т.ін.



**Розрахунок гідравлічний (гідродинамічний)** – проводиться з метою визначення діаметрів підвідних паропроводів і необхідного тиску пари, що надходить у систему пароподачі теплової установки.

### С

**Спучування** – це явище збільшення матеріалу (переважно глинистого) в об'ємі за рахунок утворення і тиску газів всередині замкнутих пор. Даним способом одержують пористі заповнювачі для легких бетонів.

**Сушіння в киплячому шарі** – спосіб сушіння кускових і сипких матеріалів, які знаходяться у зваженому стані.

### Т

**Тепловологісна обробка** – теплова обробка бетону з умовою збереження вологи в матеріалі (при підвищеній відносній вологості навколишнього середовища).

**Теплота плавлення питома** – теплота, що витрачається на перехід одиниці маси речовини з твердого стану в рідкий при температурі плавлення.

**Термоформа** – установка, що поєднує в собі конструкцію для формування бетонного або залізобетонного виробу і його теплової обробки шляхом *контактного прогрівання*.

**ТЕН (трубчастий електронагрівач)** – електричний нагрівач опору, що складається з нагрівального елемента, який має на кінцях контактні стержні і запресований разом з наповнювачем в металеву оболонку. Використовується в інфрачервоних установках для *електрообігрівання* бетону.

**Тепловий баланс** – співставлення надходжень і витрат (корисно використаної і втраченої) теплоти в процесах теплової обробки матеріалів. Виражає закон збереження енергії (теплової енергії) процесу. Використовується для аналізу теплових процесів.

### У

**Установка касетна** – формувально-тепловий агрегат для формування і теплової обробки залізобетонних виробів у вертикальному положенні.

### Я

**Ямна пропарювальна камера** – найбільш поширений вид теплових установок в технології збірного залізобетону. Представляє собою напівзаглиблену або наземну камеру прямокутної форми, обладнану системами пароподачі, вентиляції, відведення конденсату і встановлення виробів із формами.



## Рекомендована література

---

1. Бойко В.Е., Тихомиров Е.В. Тепловая обработка в производстве сборного железобетона. – К.: Будівельник, 1987. – 144 с.
2. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Бордюженко О.М. та ін. Будівельне матеріалознавство: Цементи, бетони і розчини. Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2007. – 226 с.
3. Драганов Б.Х., Долінський А.А. та ін. Теплотехніка. – Київ: "Інкос", 2005. – 504 с.
4. Кокшарев В.Н., Кучеренко А.А. Тепловые установки: Учебник. – Киев: В.Ш. 1990. – 335 с.
5. Марьямов Н.Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона. – М.: Стройиздат, 1970. – 271 с.
6. Перегудов В.В. Теплотехника и теплотехническое оборудование / Под ред. Н.Ф.Еремина. – М.: Стройиздат, 1990. – 336 с.
7. Перегудов В.В., Роговой М.И. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей. – Москва: Стройиздат, 1983. – 416 с.
8. Рекомендации по снижению расхода тепловой энергии в камерах для тепловлажностной обработки железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1984. – 56 с.
9. Чепурний М.М. Основи технічної термодинаміки: Підручник/ М.М.Чепурний, С.Й.Ткаченко. – Вінниця: Поділля-2000, 2004.
10. Шестаков В.Л. Задачі та вправи з технічної термодинаміки та теплових процесів технології будівельних матеріалів. – Рівне: НУВГП, 2008. – 190 с.
11. Шестаков В.Л. Термодинаміка. Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП. – 2009. – 150 с.
12. Конспект лекцій "Теплотехнічні процеси в технології будівельних матеріалів". – Рівне: НУВГП, №059-138.
13. Методичні вказівки до виконання курсової роботи №2 з дисципліни "Основи термодинаміки, теплотехніка і теплотехнічне обладнання" (розділ "Теплова обробка бетонних і залізобетонних виробів") для студентів напряму "Будівництво" / Бордюженко О.М. – НУВГП, 2008 р. – 47 с., № 059-151.
14. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Теплотехнічне обладнання" (розділ "Тепловологісна обробка") для студентів спеціальності 6.092100 "Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів" / О.М.Бордюженко. – Рівне: НУВГП, 2004. – 28 с., № 059-127.
15. <http://tbk.rv.ua/load/> (Архів навчально-методичного забезпечення сайту кафедри ТБВіМ).





## З М І С Т

ПЕРЕДМОВА .....	3
1. ОПИС ТА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ .....	4
2. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ НАВЧАЛЬНОЇ РОБОТИ І РОЗПОДІЛ БАЛІВ .....	8
3. ПРОГРАМНИЙ МАТЕРІАЛ ЗМІСТОВИХ МОДУЛІВ (МОДУЛІ № 3-4) ...	13
<i>Модуль 3. Процеси сушіння, випалу і плавлення матеріалів.....</i>	<i>13</i>
3.1. Поняття про тепло- і масообмін при сушінні .....	13
3.1.1. Зовнішній тепло- і масообмін при сушінні.....	13
3.1.2. Внутрішній тепло- і масообмін.....	18
3.2. Сушильні установки для порошкоподібних матеріалів та суспензій .....	19
3.2.1. Пневматичні сушарки.....	19
3.2.2. Сушильні установки для суспензій.....	21
3.2.3. Сушарки киплячого шару .....	25
3.3. Сушильні установки для формованих виробів .....	26
3.3.1. Камерні сушарки.....	26
3.3.2. Тунельні сушарки .....	28
3.3.3. Сушарки для листових виробів .....	31
3.4. Випал керамічних виробів та матеріалів .....	33
3.4.1. Випал керамічних виробів .....	33
3.4.2. Процеси спучування і спікання при випалі штучних заповнювачів бетону .....	35
3.5. Установки для випалу керамічних виробів та матеріалів .....	38
3.5.1. Печі для випалу формованих виробів .....	38
3.5.2. Печі для випалу штучних заповнювачів бетону .....	44
3.6. Процеси плавлення. Плаவில்ні установки.....	48
<i>Модуль 4. Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону .....</i>	<i>53</i>
3.7. Загальні відомості про теплову обробку бетону.....	53
3.7.1. Поняття теплової і тепловологісної обробки. Фізико-хімічні процеси, що відбуваються в бетоні при ТВО.....	53
3.7.2. Способи теплової обробки бетону .....	54
3.8. Екзотермія бетону .....	58
3.9. Тепло- і масообмін при тепловологісній обробці.....	60
3.10. Режими тепловологісної обробки.....	67
3.10.1. Поняття режиму тепловологісної обробки .....	67
3.10.2. Фактори, що визначають раціональні режими теплової обробки.....	69
3.10.3. Попереднє витримування бетону .....	73



3.10.4. Особливості режимів теплової обробки в пароповітряному середовищі .....	74
3.10.5. Теплова обробка в середовищі чистої насиченої пари .....	79
3.10.6. Теплова обробка контактним способом.....	80
3.11. Класифікація установок для тепловологісної обробки.....	83
3.12. Теплові установки періодичної дії.....	86
3.12.1. Ямні камери.....	86
3.12.2. Касетні установки .....	93
3.12.3. Стенди формування і паропрогріву.....	97
3.12.4. Термоформи .....	100
3.12.5. Автоклавні установки.....	104
3.13. Теплові установки неперервної дії.....	109
3.13.1. Горизонтальні камери неперервної дії.....	109
3.13.2. Вертикальні пропарювальні камери.....	118
3.13.3. Вібропрокатні стани .....	120
3.14. Електротеплова обробка бетону .....	122
3.14.1. Електропрогрівання.....	123
3.14.2. Електрообігрівання бетону випромінюванням .....	126
3.14.3. Прогрівання бетону в електромагнітному полі.....	128
3.15. Основи розрахунку установок для тепловологісної обробки.....	130
3.15.1. Загальні принципи .....	130
3.15.2. Розрахунок установок періодичної дії.....	131
3.15.3. Розрахунок установок неперервної дії.....	135
3.15.4. Розрахунок установок електротеплової обробки.....	138
3.15.5. Розрахунок автоклавів.....	142
3.16. Шляхи зниження енерговитрат при тепловій обробці бетону ...	144
3.16.1. Основні напрямки зменшення витрат тепла.....	144
3.16.2. Ефективні рішення огорожувальних конструкцій камер теплової обробки .....	147
3.16.3. Ефективні системи паророзподілу .....	151
3.16.4. Геліотермальна обробка бетону .....	155
4. ПРАКТИКУМ. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ .....	157
5. ЗАВДАННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ .....	171
5.1. Теплофізичні характеристики тепловологісної обробки бетону .	171
5.2. Температурні перепади в бетонних виробих при тепловій обробці.....	175
6. ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ МОДУЛЬНИХ КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ.....	178



7. ЗАВДАННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ РОБОТИ .....	186
7.1. Загальні вимоги до оформлення роботи .....	186
7.2. Приклади завдань на курсову роботу .....	187
7.3. Рекомендації до виконання курсової роботи .....	190
7.3.1. Вибір режиму тепловологісної обробки .....	190
7.3.2. Технологічні параметри та конструктивні характеристики теплової установки .....	196
7.3.3. Розрахунки тепловиділення бетону .....	205
7.3.4. Матеріальний баланс теплової установки .....	207
7.3.5. Тепловий баланс теплової установки .....	208
7.3.6. Гідравлічний розрахунок .....	213
8. ТЕМАТИКА ТА ЗАВДАННЯ НА САМОСТІЙНУ РОБОТУ .....	216
8.1. Загальні рекомендації до самостійної роботи .....	216
8.2. Завдання для самостійного розв'язання задач .....	216
8.2.1. Процеси сушіння, випалу і плавлення матеріалів .....	217
8.2.2. Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону .....	219
8.3. Теми рефератів для самостійної роботи .....	221
9. ТЕРМІНОЛОГІЧНИЙ СЛОВНИК .....	223
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА .....	227



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Навчальне видання

*Бордюженко Олег Михайлович*

## **Основи термодинаміки, теплотехніка та теплотехнічне обладнання**

**Частина 2**

*Процеси сушіння, випалу і плавлення.*

*Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону*

**Навчальний посібник**

**Європейська кредитно-трансферна система**

*Друкується в авторській редакції*

Підписано до друку 25.09.2010 р. Формат 60×84 1/16.  
Папір друкарський №1. Гарнітура Times. Друк різнографічний.  
Ум.-друк арк.13,4 Обл.-вид. арк. 14,1.  
Тираж 100 прим. Зам. № 1473.

*Редакційно-видавничий центр  
Національного університету  
водного господарства та природокористування  
33028, м. Рівне, вул. Соборна, 11.*

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру  
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції  
РВ №31 від 26.04.2005 р.*