

*Радченко М.І., д.т.н., Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова,
НДІ проблем екології та енергозбереження, м. Миколаїв*

*Сирота О.А., к.т.н.; Макарова О.В., аспірант, Миколаївський державний гуманітарний
університет ім. Петра Могили*

ПЕРСПЕКТИВНИЙ НАПРЯМОК ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТЕРМООБРОБКИ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ У АВТОКЛАВАХ

Розглянуто проблему підвищення екологічної безпеки й енергетичної ефективності процесів термообробки будівельних матеріалів у парових автоклавах. Запропонована робота автоклава з перепуском відпрацьованої в автоклаві пари за допомогою струминного пристрою та попереднім прогрівом автоклава газоподібними продуктами згоряння.

A problem of increasing of ecological safety and heat treatment of building materials in steam processes is examined in the article. Work of an autoclave with transfer of exhaust steam by use of a stream arrangement and preliminary heating of the autoclave by gas combustion products is proposed.

1. Стан проблеми та мета дослідження

Виробництво будівельних матеріалів в автоклавах із використанням пари є доволі енергоємним, потребує значних сировинних та енергетичних ресурсів. Близько 45% теплоти, затраченої в циклі термообробки, акумулюється в автоклаві: більша частка – будівельним матеріалом (силікатною цеглою, бетоном), а решта – парою у вільному об'ємі автоклаву. При випуску відпрацьованої пари з автоклаву в атмосферу її теплота втрачається. Спалювання в котельній палива для виробництва цієї кількості пари призводить до збільшення екологічного навантаження на довкілля через велику кількість шкідливих викидів з котельної в атмосферу: окису вуглецю, двоокису азоту, ангідриду сірчистого, ванадію п'ятиокису та сажі при роботі котельної на мазуті; окису вуглецю та окислів азоту при роботі на газі. Найбільш ефективні з існуючих методів очищення відхідних газів котельної, а саме – мокрим способом, супроводжуються значним зменшенням температури газів, а відтак різко скорочують можливість подальшого використання

їхнього теплового потенціалу. До того ж вони пов'язані з додатковими енергетичними й матеріальними витратами. Апарати ж сухого типу не забезпечують необхідного рівня очищення, доволі громіздкі, і їхнє включення у тракт відпрацьованих газів потребує додаткових енергетичних витрат на подолання аеродинамічного опору. Отже, проблема раціонального використання пари, а значить, і паливних ресурсів тісно пов'язана з токсичними атмосферними викидами і є вельми актуальною. Впровадження ресурсозберігаючих технологій сприятиме не тільки підвищенню енергетичної ефективності виробництва будівельних матеріалів завдяки економії палива, але й зменшенню екологічного навантаження на навколишнє природне середовище [1].

2. Аналіз існуючих шляхів вирішення проблеми та обґрунтування вибору напрямку дослідження

Найбільш поширені шляхи повторного використання відпрацьованої в автоклавах пари зводяться до її перепуску в підготовлені до роботи автоклави під дією перепаду тиску в автоклаві-

джерелі й автоклави-приймальнику [2-4]. Завдяки економії пари підвищується ККД котельної. Вельми прогресивним напрямком у ресурсозберігаючих технологіях теплової обробки будівельних матеріалів є використання продуктів згоряння природного газу. Така технологія застосовується при виробництві збірного залізобетону [5] і забезпечує зменшення споживання палива підприємствами на 20...25 % [6].

При цьому можуть використовуватись як продукти згоряння природного газу в автономних теплогенераторах із температурою 150...180 °С, так і відхідні гази від котельної, яка працює на природному газі, що збільшує ККД котельної на 10...15 % [7], або ж ті та інші одночасно. Теплову обробку керамзитобетонних панелей продуктами згоряння природного газу здійснюють в ямних камерах. У нижній частині стін камер є отвори для входу та виходу продуктів згоряння газу, які можуть надходити в камеру зі спеціальної печі або з димаря парового котла (проходячи через змішувач, сполучений з димарем). На продуктах згоряння природного газу в автономних теплогенераторах із температурою 150...180 °С і відносною вологістю 10...20 % працюють ямні камери з випуску добірних бетонних виробів і щілинні камери з виробництва тришарових стінових панелей з утеплювачем із пінополістиролу, внутрішніх стінових панелей та плит покриттів за конвеєрною технологією Львівського ДБК-2 [5]. Тривалість прогріву в ямних камерах становила 7 г. При цьому температура газу між плитами повільно зростала до 96 °С, а самих бетонних плит – до 70 °С, після чого теплогенератор відключали. Термосна витримка бетону в газовому середовищі з відносною вологістю близько 85...90 % тривала 9...10 г. Температура бетону за цей час підвищувалась до 74 °С. Витрата природного газу становила 16 $\text{м}^3/\text{м}^3$ залізобетону.

Дослідження показують, що використання продуктів згоряння природного газу для термообробки бетонних панелей у касетах зменшує витрати палива на 1 м^3 бетону в 4...10 разів. Якщо на тепловологісну обробку бетону паром слід витратити від 70 до 102 м^3 газу, то при використанні продуктів згоряння газу – тільки 10...20 м^3 [1].

Пара як теплоносіє має переваги перед продуктами згоряння природного газу наступні переваги: високий коефіцієнт тепловіддачі, що дозволяє швидко прогрівати бетонні прошарки виробів; екологічно чистим теплоносієм, оскільки не містить шкідливих речовин на відміну від продуктів згоряння природного газу, вміст оксидів вуглецю в яких складає 5...5,5 % [5].

В той же час сухе середовище продуктів згоряння природного газу стримує корозію металевих поверхонь, а завдяки взаємодії вуглекислого газу та окису вуглецю з продуктами гідролізу та гідратації цементу в виробках поглинається до 45 % шкідливих викидів, утворюючи на поверхні бетону стійке до

кліматичних умов покриття [5].

Враховуючи більш низький коефіцієнт тепловіддачі продуктів згоряння природного газу, їх температура повинна бути вищою, ніж 100...120 °С при швидкості руху 2...4 м/с.

В умовах зниженої вологості в камері, високих температури та швидкості руху газу з поверхні бетону буде інтенсивно випаровуватись волога, а завдяки високому вмісту в середовищі вуглекислого газу можлива карбонізація бетону [1, 5]. Для запобігання пересушенню поверхні бетону дуже важливо вірно призначити та витримати режими прогріву. З урахуванням слабкого вивчення цього процесу дозволяється прогрівати в ямних камерах таким методом виробу з легкого бетону низьких марок, в які при його приготуванні вводиться значно більше води для забезпечення необхідної пластичності суміші. Для прогріву виробів із важкого бетону слід взяти відповідні заходи щодо зволоження середовища в камері або запобігти великим втратам вологи з поверхні бетону за допомогою спеціальних плівкоутворюючих покриттів.

Карбонізація протягом періоду термообробки бетону не здійснює на нього помітного негативного впливу [1]. За даними [8] карбонізація позитивно впливає на підвищення міцності бетону в процесі теплової обробки. Так, якщо під кінець автоклавної обробки в системі залишається вільний гідрат окису кальцію, то подальший процес твердіння бетону може продовжуватися і після вилучення виробу з автоклаву, головним чином за рахунок карбонізації $\text{Ca}(\text{OH})_2$ під впливом вуглекислоти повітря.

Використання продуктів згоряння природного газу є сьогодні перспективним способом тепловологісної обробки будівельних матеріалів і конструкцій, зокрема збірного залізобетону [1, 5, 6]. Цей спосіб дозволяє покращити теплові баланси підприємства на 20...25 % завдяки зниженню втрат, що мають місце при використанні пари. Розроблено проекти реконструкції тунельних камер безперервної дії, які забезпечують теплову обробку продуктами згоряння природного газу. Відомий досвід роботи аналогічних камер на Полтавському та Альметьєвському ДБК [2].

Результати порівняльного аналізу різних способів теплової обробки показують, що на 1 м^3 виробів у камерах з термоелектричними елементами (ТЕНами) витрата електроенергії становить 98 кВт·г, витрата пари – 250 кг і природного газу – 15 м^3 .

Аналіз шляхів скорочення шкідливих викидів і зменшення споживання палива та води свідчить про те, що вони далеко не вичерпують наявних резервів. Так, перепуск відпрацьованої пари з автоклава-джерела в закритий автоклав-приймальник під дією тиску в автоклаві-джерелі не забезпечує достатньо повне використання її теплового потенціалу, оскільки глибина перепуску обмежена протитиском у автоклаві-приймальнику та падінням тиску в

перепускному паропроводі. При перепуску до автоклава-приймальника, що сполучається з атмосферою, хоча тиск у автоклаві-джерелі й знижується майже до атмосферного, та все ж мають місце втрати теплоти з “пролітною” парою, яка викидається в атмосферу з автоклава-приймальника. До того ж майже вся зекономлена теплота йде на прогрів завантаженого сирцем автоклава-приймальника. Цих витрат теплоти можна було б запобігти, якби прогрів здійснювали відхідними газами, наприклад після випалювання вапна або ж від котельної.

Метою дослідження є розробка системи теплопостачання автоклавів, яка забезпечувала б підвищення екологічної безпеки та енергетичної ефективності автоклавного виробництва будівельних матеріалів шляхом комплексної утилізації теплоти відпрацьованої в автоклавах пари та відхідних газів.

3. Система теплопостачання автоклавів із комплексною утилізацією теплоти відпрацьованої в автоклавах пари та відхідних газів

Розроблена система теплопостачання автоклавів передбачає застосування перепуску відпрацьованої пари з автоклава-джерела в завантажений сирцем автоклав-приймальник, попередньо прогрітий відхідними газами. Такими газами можуть бути як відхідні гази від печей випалу вапна, температура яких може сягати 900 °С [9], тобто попереднього етапу технологічного ланцюга, так і продукти згоряння від котельної.

Завдяки застосуванню як теплоносія відхідних газів скорочуються витрати пари на нагрів сирцю до температури 100 °С, яка відповідає температурі кипіння води при атмосферному тиску. Ця частка досить вагома і становить приблизно 40 % загальної кількості споживаної теплоти. Застосування газового прогріву замість парового суттєво ускладнює умови перепуску, коли традиційний перепуск під дією перепаду тиску в автоклавах-джерелі та приймальнику може стати навіть неефективним. Справа в тому, що при звичайному перепуску без попереднього прогріву газом сирцю ледь частка відпрацьованої пари, яка надходить в автоклав-приймальник, конденсується в результаті відводу теплоти на прогрів сирцю з початковою температурою близько 40 °С та випаровування води, утримуваної в порах сирцю. Це спричиняє уповільнене підвищення тиску в автоклаві-приймальнику, а значить, і більший перепад тиску в автоклавах і відповідно більшу кількість пари, що перепускається.

У разі ж перепуску з попереднім газовим прогрівом сирцю до температури 70...80 °С різниця температур пари й сирцю значно менше, ніж у разі перепуску пари в непрогрітий автоклав, де

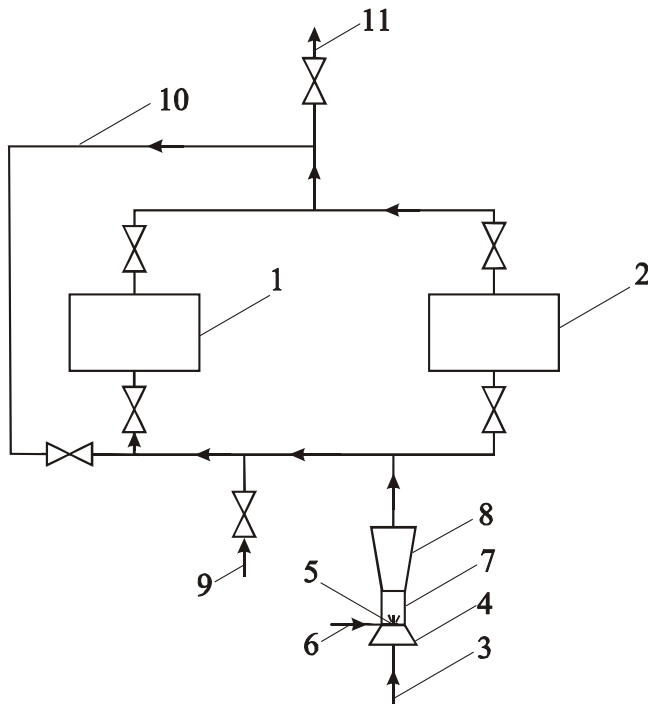
температура сирцю близько 40 °С. Отже, й інтенсивність конденсації пари, яка залежить від різниці температур пари і сирцю, також нижче. Відповідно й тиск в автоклаві-приймальнику буде підвищуватись з самого початку перепуску і більш прискореними темпами, ніж у базовому варіанті без попереднього прогріву. Отже, й рушійна сила перепуску, якою є різниця тиску в автоклавах, буде меншою, що призведе до скорочення обсягів перепуску пари. Щоб цьому запобігти, необхідно вдаватися до застосування додаткової рушійної сили, якою може слугувати високий тиск гострої пари від котельні. Потенційну енергію гострої пари високого тиску можна спрацьовувати в струминному апараті – ежекторі, яким підсмоктувати відпрацьовану пару з автоклава-джерела й подавати суміш у автоклав-приймальник [10]. Завдяки підвищенню тиску відпрацьованої пари в ежекторі перепуск триває навіть при від’ємній різниці тисків у автоклавах, коли тиск в автоклаві-джерелі стає меншим, ніж у приймальнику.

Ефективність теплової обробки відхідними газами можна підвищити, якщо в гази перед їх подачею в автоклав упорскувати дрібнорозпилену воду. Зволоження газу сприяє покращенню практично всіх показників термообробки: підвищується інтенсивність теплообміну, різко зменшується усушка поверхневих шарів матеріалу, покращуються його екологічні показники. Упорскування води необхідно здійснювати форсункою тонкого розпилення і в спеціальному чині зпрофільований пристрій – так званий термопресор, у конфузорі якого газ прискорюють до швидкості, близькій, але не вище звукової. При випаровуванні дрібнорозпиленої води у прискореному потоці відхідних газів їх тиск підвищується. Таке явище відоме як ефект теплової компресії.

Підвищення тиску відхідних газів за рахунок випаровування упорскуваної дрібнорозпиленої води достатнє для подолання аеродинамічного опору їхньому рухові через автоклав-приймальник і дозволяє запобігти додатковим енергетичним витратам, які мали б місце у разі стиснення відхідних газів, наприклад у механічному нагнітачі – газодувці з приводом від електродвигуна. Відхідними газами можуть бути продукти згоряння від котельної або печі випалу вапна.

На рисунку зображена автоклавна установка, в якій реалізується запропонований спосіб.

Робота автоклавної установки здійснюється наступним чином. Автоклав-приймальник 1, завантажений сирим матеріалом і сполучений із атмосферою через лінію випуску 11, нагрівають відхідними газами, які підводять лінією подачі відхідних газів 3 до приймальної камери 4 струминного термопресора. В потік відхідних газів розприскувачем води 5 упорскують воду, яку підводять із лінії подачі води 6. За рахунок

**Автоклавна установка:**

- 1 – автоклав-приймальник;
- 2 – автоклав-джерело;
- 3 – лінія подачі відхідних газів;
- 4 – приймальна камера термопресора;
- 5 – розприскувач води;
- 6 – лінія подачі води;
- 7 – камера випаровування термопресора;
- 8 – дифузор термопресора;
- 9 – лінія подачі гострої пари;
- 10 – лінія перепуску відпрацьованої пари;
- 11 – лінія випуску в атмосферу

випаровування води в потоці відхідних газів у камері випаровування 7 тиск газів підвищується.

Остаточне підвищення тиску газів здійснюють у дифузори 8 струминного термопресора. Стиснені відхідні гази подають в автоклав-приймальник 1, нагріваючи завантажену в ньому сировину. Після закінчення процесу термообробки в автоклав-джерелі 2 з нього випускають пару в нагрітій відхідними газами автоклав-приймальник 1, який відключають від ліній подачі відхідних газів 3 і випуску в атмосферу 11. Для цього автоклав-джерело 2 відключають від лінії подачі гострої пари 9 і підключають до лінії перепуску відпрацьованої пари 10. Відпрацьовану в автоклав-джерелі 2 пару направляють в автоклав-приймальник 1 лінією перепуску відпрацьованої пари 10. Перепуск закінчують, коли тиск в автоклав-приймальнику 1 підіймається до тиску в автоклав-джерелі 2. Після цього автоклав-приймальник 1 відключають від лінії

перепуску відпрацьованої пари 10 і підключають до лінії подачі гострої пари 9. За рахунок високого тиску гострої пари підвищують тиск в автоклав-приймальнику 1 до робочої величини (0,8...1,6 МПа в залежності від тиску в котельні), після чого проводять процес термічної обробки при робочому тиску.

Завдяки нагріву автоклава-приймальника відхідними газами, стисненими у процесі випаровування дрібнорозпиленої води, яку упорскують у потік відхідних газів, скорочуються витрати тепла з парою на нагрів автоклава-приймальника і, як результат, підвищується енергетична ефективність роботи автоклавної установки.

Розрахунки показали, що при тиску гострої пари 1 МПа, нагріві завантаженого сировиною автоклава-приймальника відхідними газами до 80 °С кількість споживаної гострої пари скорочується

Література

1. Крылов Б.А. Эффективное ресурсосбережение. (На примере железобетонных конструкций). – М.: Знание, 1989. – 64 с.
2. Вахнин М.П., Анищенко А.А. Производство силикатного кирпича. – М.: Высшая школа, 1989. – 200 с.
3. Хавкин Л.М. Технология силикатного кирпича. – М.: Стройиздат, 1982. – 384 с.
4. Зейфман М.И. Изготовление силикатного кирпича и силикатных ячеистых материалов. – М.: Стройиздат, 1990. – 184 с.
5. Гошовский Ю.М., Чуприна Н.Г., Коршунов М.А., Дикань С.А., Куприянов Н.Н. Прогрев изделий продуктами сгорания природного газа // Строительные материалы и конструкции. – 1990. – № 4. – С. 26-28.
6. Гринберг О.Р., Кагнер А.З., Данилов М.П., Ветвицкий И.Л. Реконструкции тоннельных камер для ТВО изделий продуктами сгорания природного газа // Бетон и железобетон. – 1987. – № 7. – С. 24.
7. Технология бетонных и железобетонных изделий: Учебник для инж.-строит. вузов / Под ред. В.Н. Сизова / – М.: Высшая школа, 1972. – 520 с.
8. О.А. Гершберг Технология бетонных и железобетонных изделий. – Москва: Изд-во литературы по строительству, 1965. – 320 с.
9. Комар А.П. Технология производства строительных материалов. – М.: Высшая школа, 1990. – 446 с.
10. Радченко М.І., Сирота О.А., Щербак Ю.Г., Макарова О.В. Патент України № 71358. Автоклавна установка термообробки паром під тиском. – Бюлетень. – 2005. – №