

УДК 66.042.88, 666.1.031.2

Кошельник О.В.<sup>1</sup>, Морозов О.Є.<sup>2</sup>, Кошельник В.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

## ПЕРСПЕКТИВНІ СИСТЕМИ БАГАТОСТУПІНЧАТОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ДИМОВИХ ГАЗІВ ПРОМИСЛОВИХ СКЛОВАРНИХ ПЕЧЕЙ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

Проаналізовано сучасні схеми багатоступінчастої утилізації теплоти димових газів промислових скловарних печей безперервної дії. Для підвищення їх ККД запропоновано введення додаткового ступеня утилізації з застосуванням пластинчастих теплообмінників або теплообмінників з оребреними трубками.

Проанализированы современные схемы многоступенчатой утилизации теплоты дымовых газов промышленных стекловаренных печей непрерывного действия. Для повышения их КПД предложено введение дополнительной ступени утилизации с применением пластинчатых теплообменников или теплообменников с оребренными трубками.

Present-day schemes of multistaged recycling systems of smoke gas heat of continuous industrial glass furnaces have been analysed. An additional stage of recycling apart of production by plate heat exchangers or ribbed tube heat exchangers is proposed to increase efficiency of heat-and-technological complexes for glass production.

$B$  – економія палива;

$b$  – питома витрата палива на вироблення тепла в установці;

$G$  – кількість енергоносія;

$i$  – ентальпія теплоносія;

$Q$  – кількість тепла, що виробляється за рахунок вторинних енергоресурсів;

$\beta$  – коефіцієнт невідповідності часу роботи основного агрегату та утилізаційної установки;

$\sigma$  – коефіцієнт використання тепла, виробленого в утилізаційній установці;

$\eta$  – ККД установки;

ВЕР – вторинні енергоресурси.

### Індекси нижні:

зам – заміщувана;

$t$  – теплота;

ут – утилізатор;

1 – параметри на вході;

2 – параметри на виході.

Високотемпературні теплотехнологічні установки, в яких у якості джерела теплової енергії використовуються різні види органічного палива, складають основу промислових комплексів найбільш енергоємних галузей промисловості України, до яких відноситься й скловарне виробництво.

За останні двадцять років питома споживання енергії на виробництво тони скла в світі скоротилося в середньому вдвічі та складає на даний час від 3,5 до 12 ГДж/т в залежності від виду скла, конструкції та продуктивності печі. Одночасно із цим було також удосконалено технологію виробництва та досягнуто послідовне зниження маси готових скляних виробів. Таким чином, питома споживання енергії в галузі, віднесене до одиниці продукції, скоротилося на 60...70 %. Для деяких типів

печей, зокрема регенеративних печей великої потужності, досягнута енергоємність процесу наближається до теоретичного мінімуму, який становить від 2,25 (кришталеве скло) до 2,68 ГДж/т (листоове та тарне скло) [1, 2]. Незважаючи на введення в дію за останні роки на скловарних підприємствах України декількох сучасних печей великої потужності, загальні питомі витрати енергії в галузі є значно більшими, ніж у промислово-розвинутих країнах. Тому в Україні існує подальша необхідність підвищення енергоефективності скляного виробництва в зв'язку з постійно зростаючою ціною органічного палива, насамперед природного газу, та жорсткою конкуренцією на світових ринках.

Основним технологічним агрегатом при виробництві скла є плавильні скловарні печі.

Для виробництва більшості видів скла застосовуються регенеративні або рекуперативні плавильні печі безперервної дії ванного типу [3, 4]. Аналізуючи структуру витрат енергії на прикладі виробництва тарного скла, можна визначити, що 70 % витрачається на скловарну піч; по 5 % – на пристрої для завантаження шихти, компресори та лери; 3 % – на вентилятори; до 10 % – на інше обладнання [5]. Таким чином, саме ефективність експлуатації скловарних печей з позиції продуктивності, тривалості робочої кампанії, витрат палива і якості продукції практично повністю визначає ефективність скляного виробництва.

Сучасна регенеративна піч може мати загальну теплову ефективність близько 50 %, причому втрати з димовими газами становлять понад 20 %. Електричні печі та печі із примусовим кисневим дуттям звичайно мають кращі питомі характеристики в порівнянні з печами на органічному паливі, але для них є характерним ряд недоліків, що обмежують їх широке використання. Характеристики деяких типів сучасних печей для виробництва сортового та тарного скла наведені в табл. 1 [2].

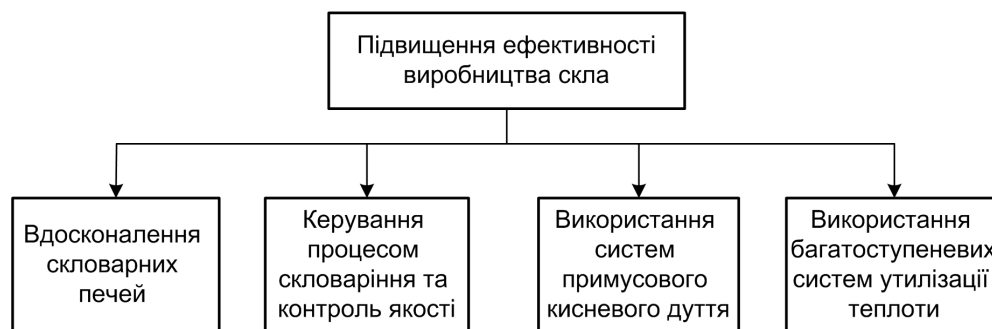
Рішення щодо зниження споживання енергії в скловарному виробництві можна реалізувати у двох напрямках: поліпшенням керування енергоспоживанням (зниження витрат на енергію при незмінному обсязі виробництва) і підвищенням ефективності виробництва шляхом скорочення долі некондиційних виробів та відходів (сталість витрат на енергію при зростанні випуску придатної продукції).

На рис. 1 наведено схему, що відображає основні напрямки підвищення ефективності скляного виробництва.

До першої групи можна віднести використання ефективної теплоізоляції печі та регенераторів, сучасних типів вогнетривів, застосування ущільнювальних кілець на пальникових пристроях. Другу групу складають заходи, що направлені на оптимізацію режимів роботи печі, зменшення кількості некондиційної продукції. Окремо слід виділити можливість застосування систем примусового кисневого дуття. В основі цього методу лежить використання замість повітря горіння (повністю або частково) кисню чистотою понад 93 %. Але дослідження показали, що цей

Табл.1. Характеристики сучасних типів скловарних печей безперервної дії

Тип печі	Вид палива	Продуктивність, т/добу	Питоме енергоспоживання, ГДж/т
Тарне скло			
Регенеративна з поперечним напрямком полум'я	Газ	370	4,12
Регенеративна з підковоподібним напрямком полум'я	Газ	244	5,35
Рекуперативна	Газ	400	5,22
Прямого нагріву з примусовим кисневим дуттям	Газ	350	3,35
Сортове скло			
Регенеративна з підковоподібним напрямком полум'я	Газ (мазут)	165	4,8
Комбінована рекуперативна	Газ та електроенергія	30	9,5
Електрична	Електроенергія	65	3,42



**Рис. 1. Основні напрямки підвищення ефективності виробництва скла.**

метод можна ефективно застосовувати тільки для печей малої продуктивності, які мають малоефективні системи утилізації теплоти або там, де вони зовсім відсутні [1].

Майже усі сучасні скловарні печі обладнані регенеративними або рекуперативними теплообмінниками для утилізації теплоти димових газів. Процес скловаріння супроводжується виходом значних об'ємів димових газів. Температура димових газів після печі складає 400...600 °С для печей регенеративного типу та 800...850 °С для рекуперативних печей. Облаштування високотемпературних установок елементами зовнішнього тепловикористання з додатковим теплоенергетичним обладнанням здійснюється з метою більш повного використання відходів теплової енергії для одержання іншої технологічної продукції – гарячої води, пари, електроенергії. В якості прикладу таких теплотехнологічних установок можна привести печі в комплексі з котлами-утилізаторами, паровими турбінами, системами випарного й водяного охолодження, водяними економайзерами, підігрівачами шихти [3, 5, 6]. Таким чином, на базі скловарної печі створюється достатньо складний енерготехнологічний комплекс, що включає в себе різні елементи, робота яких жорстко пов'язана з технологічними процесами скловаріння.

Але в багатьох випадках температура димових газів на виході при цьому залишається на рівні 200...250 °С. Для використання теплоти такого низького температурного потенціалу можливо введення в багатокаскадні системи утилізації теплоти додаткового ступеня,

де будуть застосовані теплообмінні апарати, які показали свою ефективність при такому рівні температур. В області підвищення енергоефективності відомо багато прикладів використання на підприємствах галузі технічних рішень, які вже успішно були здійснені в інших галузях. Одні рішення припускають фундаментальні зміни в процесі скловаріння, інші – засновані на величезному обсязі доступної інформації про методи підвищення ефективності використання енергії шляхом підвищення ефективності вже існуючих конструкцій печей. Це вимагає проведення додаткових досліджень щодо визначення оптимальних конструктивних та режимних параметрів роботи теплоутилізаторів у складі теплотехнологічних комплексів з виробництва скломаси.

Розглянемо кілька варіантів подібних схем стосовно ванних скловарних печей безперервної дії, які найбільш широко використовуються для промислового виробництва скла. На рис. 2 представлена схема енерготехнологічного комплексу на основі скловарної печі, де використовуються котел-утилізатор (КУ) для виробництва пари та додаткові теплообмінники для підігріву природного газу і нагрівання води.

За скловарною піччю СП встановлені два радіаційно-конвекційні рекуператори Р1, Р2 з жароміцної сталі. Вони забезпечують підігрів повітря горіння до температури 800 °С за рахунок теплоти димових газів (25000 м<sup>3</sup>/год). Далі розташовані газопідігрівачі ГП1, ГП2, що забезпечують підігрів природного газу до температури 50 °С. Температура димових газів за

ними становить 690 °С. Після газопідігрівачів обидва газоходи поєднуються і димові газу підводять до котла-утилізатора. Спочатку вони потрапляють у перегрівник, а потім в КУ, що являє собою водотрубний котел із природною циркуляцією. Він виробляє пару енергетичних параметрів: тиск  $P_{\text{п}} = 3,0$  МПа, температура перегрітої пари  $t_{\text{п}} = 430$  °С. При цьому температура димових газів знижується до величини 310 °С. В якості останнього ступеня в системі утилізації тепла димових газів використаний підігрівник живильної води ВЕ, що складається із двох змієвикових пакетів. Установа обладнана тягодуттьовими пристроями Д для подолання аеродинамічного опору, який виникає при встановленні додаткового утилізаційного устаткування. Таким чином, в даній схемі за рахунок додаткового теплоенергетичного устаткування температура газів на вході в димар знижується до 200 °С.

Слід зазначити, що оптимальне рішення повинне вибиратися для кожного конкретного випадку з урахуванням експлуатаційних параметрів працюючих установок і можливостей підприємств. Використання теплоти димових газів для опалення в багатьох випадках може виявитися неефективним через невелику потребу в тепловій енергії на даному підприємстві та значні коливання навантаження протягом року. Тому більш ефективним засобом використання надлишкової теплоти димових газів є застосу-

вання комбінованих схем утилізації тепла. В таких установках поряд з КУ використовуються парові турбіни в блоці з генераторами для виробництва електроенергії або компресорами для стиснення повітря. Застосування газових турбін у таких комплексах, як правило, виключено через сильну запиленість газів і низький рівень тиску.

Розглянемо більш складний промисловий комплекс з розгалуженою схемою використання теплоти димових газів чотирьох склоплавильних агрегатів (рис. 3) [6]. Одна піч – рекуперативна (кількість газів, що відходять – 7800 м<sup>3</sup>/год), інші три – регенеративні (кількість газів, що відходять – 12600, 15200, 17400 м<sup>3</sup>/год відповідно). Через загальний газохід потік димових газів розділяється на два потоки, що подаються до КУ. Там вони охолоджуються до 250 °С. В КУ1 виробляється насичена пара з тиском 4,0 МПа. Розташований за ним котел-перегрівник КП виробляє додаткову кількість пари з енергетичними параметрами – тиском 3,8 МПа і температурою 375 °С. Таким чином, загальна кількість виробленої в теплотехнологічному комплексі пари сягає 10,5 т/год. Котел КУ2 з додатковим спалюванням палива й перегрівником забезпечує виробництво пари в кількості 6,2 т/год. Далі обидва потоки поєднуються, пара тут має наступні параметри: тиск – 3,8 МПа, температура – 416 °С. Після КУ вста-

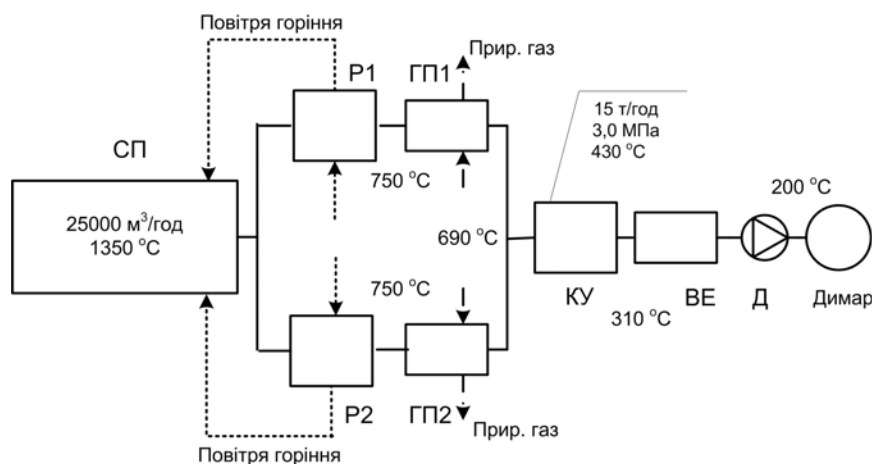
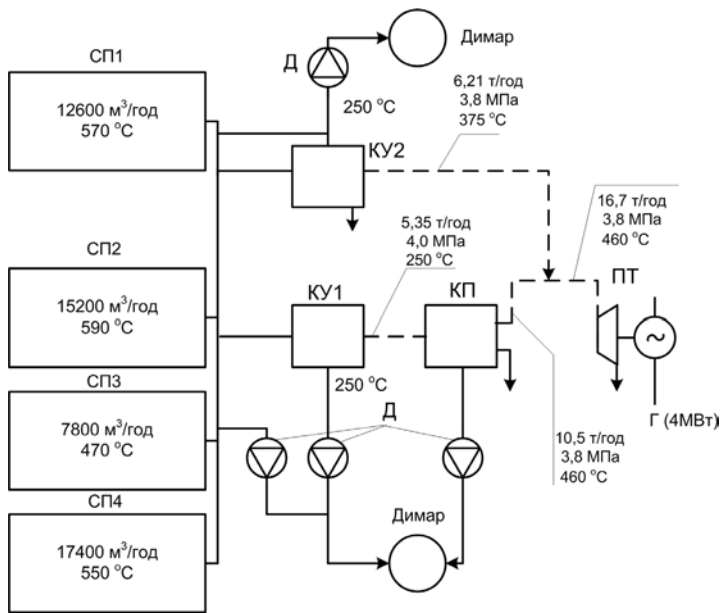


Рис. 2. Схема утилізації теплоти димових газів скловарної печі.



**Рис. 3. Схема багатоступінчастого комбінованого утилізаційного комплексу для виробництва теплової та електричної енергії.**

новлена багатоступінчаста конденсаційна турбіна ПТ і генератор Г з вихідною потужністю 4 МВт. Загальний ККД установки становить близько 27 %.

Реалізація таких схем енергозбереження має важливе екологічне значення, що призводить до зменшення забруднення навколишнього середовища шляхом скорочення викидів пилу і продуктів згоряння органічного палива. У зв'язку з тим, що розглянуті вище схеми утилізації теплоти димових газів є досить складними і потребують значних інвестицій, вибір конкретної схеми необхідно здійснювати на основі детальних техніко-економічних розрахунків. Такі складні схеми доцільно застосовувати тільки для великих промислових підприємств, що мають значну кількість теплових ВЕР і споживачів енергії.

Однак слід зазначити, що димові гази після існуючих систем утилізації теплоти скловарних печей мають температуру 200 °С і вище. Визначимо існуючий енергетичний потенціал димових газів в даних теплотехнологічних комплексах на прикладі схеми, що наведено на рис. 2.

Можливе виробництво теплової енергії (підігрів повітря горіння, вироблення пари або гарячої води в утилізаційній установці) за рахунок теплових ВЕР складе

$$Q_T = G(i_1 - i_2)\beta\eta_{ут} \quad (1)$$

При тепловому напрямку використання ВЕР економія палива визначається за формулою:

$$B = b_{зам} Q_T \sigma \quad (2)$$

Коефіцієнт  $\sigma$  показує долю тепла, яке було використане споживачами, від загальної кількості виробленого утилізаційною установкою. Величина даного коефіцієнта в значній мірі залежить від розбіжності режимів виходу ВЕР і споживання утилізаційного тепла за одиницю часу.

В формулі (2) питома витрата палива  $b_{зам}$  на вироблення тепла в установці, що заміщається, розраховується як

$$b_{зам} = \frac{0,0342}{\eta_{зам}} \quad (3)$$

де 0,0342 – коефіцієнт еквівалентного переведення 1 ГДж в тону умовного палива.

Величина  $\eta_{зам}$  показує ККД енергетичної установки, з показниками якої зіставляється ефективність використання ВЕР (залежно від умов в якості установки, що заміщується, можуть розглядатися промислові котельні і т.п.).

Виконані теплотехнічні розрахунки з використанням формул (1) – (3) показали, що при зниженні температури димових газів до рівня 100 °С, можлива кількість виробленого тепла в утилізаційній установці складе 11969 ГДж/рік (за умови трьохзмінної роботи та повного використання отриманої теплоти). Кількість палива, що буде зекономлено, у цьому випадку складе 454,8 т у.п./рік. В перерахунку на природний газ річна економія дорівнює 370,5 тис. м<sup>3</sup> або близько 740000 грн./рік. Тобто, як показали розрахунки, сьогодні теплоутилізаційні схеми скловарних печей мають ще досить великий енергетичний потенціал, для використання якого потрібно встановлення

додаткового ефективного теплообмінного обладнання.

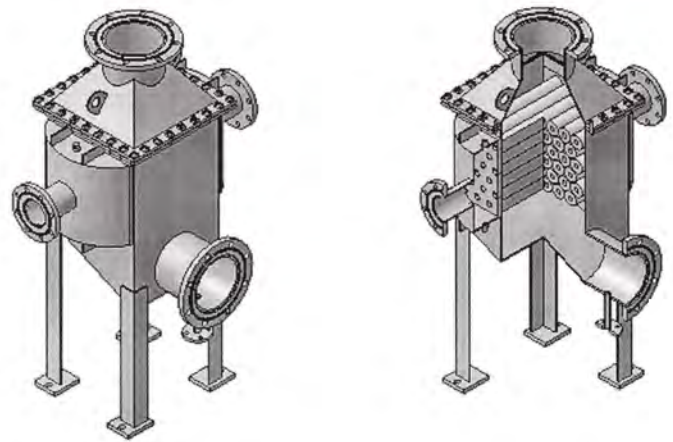
До такого можна віднести пластинчасті теплообмінні апарати з гофрованою поверхнею нагріву, які здатні передавати тепло з оптимальною теплоенергетичною ефективністю при малих температурних напорах. Широке застосування пластинчастих розбірних теплообмінників у теплоенергетиці (котельні, системи водяного опалення, водопостачання і системи охолодження), де потрібно реалізувати теплообмінні процеси при низькому рівні температур, обумовлено їх наступними якостями: високою ефективністю теплообміну; надійністю і стійкістю пластинчастих теплообмінників до зовнішніх і внутрішніх впливів; простотою монтажу і експлуатації; легкістю очищення завдяки розбірній конструкції теплообмінників; невеликими масогабаритними показниками; гнучкістю використання. Особливо слід відзначити високу інтенсивність теплообмінних процесів. Так, значення коефіцієнтів теплопередачі для цих апаратів складає від 5000 до 10000 Вт/(м<sup>2</sup>·К), питома витрата металу на одиницю площі теплопередаючої поверхні не перевищує 10...17 кг/м<sup>2</sup>. Теплообмінники мають високу ступінь уніфікації вузлів і деталей (до 90 %). Найбільш вигідною областю застосування пластинчастих теплообмінників є їхнє використання в процесах, що протікають при температурі до 200 °С і тиску до 2,0 МПа [7].

При температурному рівні понад 200 °С перспективним також є застосування теплообмінників-утилізаторів з оребреними трубками розробки УкрНДІХіммаша (рис. 4).

Вони мають достатньо велику площу поверхні теплообміну – до 200 м<sup>2</sup> та максимальну температуру використання – до 600 °С. В залежності від температури гарячого теплоносія можуть бути використані: сталеві труби з алюмінієвими ребрами – до 300 °С та сталеві труби з оребренням з жароміцних сталей – до 600 °С.

### **Висновки**

Таким чином, аналіз існуючих багатосту-



**Рис. 4. Кожухо-трубчастий теплообмінний апарат для утилізації димових газів з оребреними трубками.**

пінчастих схем утилізації тепла димових газів промислових скловарних печей безперервної дії показав, що температура газів перед димарем в таких схемах сьогодні складає 200...250 °С, незважаючи на використання різних типів теплоенергетичного та утилізаційного обладнання. Через це загальний ККД найсучасніших теплотехнологічних комплексів з виробництва скла не перевищує 50 %. Враховуючи існуючий температурний рівень вихідних газів, перспективним в таких схемах в якості останнього ступеня утилізації є використання пластинчастих або трубчастих теплообмінників з оребреними трубками. Вони показали свою ефективність в подібних умовах експлуатації в різних галузях промисловості та системах тепlopостачання. Практична реалізація даних підходів потребує проведення додаткових теоретичних досліджень щодо визначення оптимальних конструктивних та режимних параметрів роботи такого теплоутилізаційного обладнання у складі теплотехнологічних комплексів з виробництва скломаси.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. *Энергопотребление* в производстве содового, боросиликатного и специального стекла. – М.: РОО «Эколайн», 2005. – 16 с.

2. *Справочник* по наилучшим доступным техническим методам использования энергоресурсов в стекольной промышленности: производство сортового и тарного стекла. – М.: РОО «Эколайн», 2005. – 30 с.

3. *Товажнянский Л.Л., Кошельник В.М., Соловей В.В., Кошельник А.В.* Интегрированные энергосберегающие теплотехнологии в стекольном производстве: монография. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 628 с.

4. *Гойхман В.Ю., Русланов В.Н., Костырь В.А.* Печная теплотехника в производстве стекла. – Харьков: Факт, 1997. – 288 с.

5. *Кошельник О.В.* Вибір ефективних конструктивних і експлуатаційних параметрів регенеративних теплообмінників скловарних печей ванного типу // *Энерготехнологии и ресурсосбережение.* – 2008. – № 6. – С. 17-23.

6. *Koerber G.* Wirtschaftliche Verwertung von Rauchgasen hinter Glasschmelzwannen // *Glastechnische Berichte.* – 1977. – V. 50, № 3. – P. 47-53.

7. *Товажнянский Л.Л., Анипко О.Б., Малярченко В.А.* Основы энерготехнологии в промышленности. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – 436 с.

*Получено 04.06.2010 г.*