Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
(повне найменування вищого навчального закладу)

Фізико-енергетичний факультет
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Водневий енерготехнологічний комплекс для утилізації скидної теплоти скловарних печей

Виконав: студент 6 курсу, групи НФ-61
напряму підготовки (спеціальності)
8.040204 прикладна фізика
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)
Недосекіна Ю.О
(прізвище та ініціали)
Керівник Кошельнік О.В.
(прізвище та ініціали)
Рецензент Чорна Н.А
(прізвище та ініціали)

Робота захищена «___» _____ 20__ р.

з оцінкою _____

Харків – 2017 рік

РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана студенткою Недосекіной Юлією Олександрівною на тему: «Водневий енерготехнологічний комплекс для утилізації скидної теплоти скловарних печей»

Об'єктом дослідження дипломної роботи є водневий енергетичний комплекс, що використовується для утилізації теплоти димових газів скловарних печей. Предмет дослідження – процеси перетворення енергії в водневому теплоутилізаційному комплексі. Мета роботи полягає в розробці схеми та дослідженні теплофізичних показників ефективності роботи водневого енерготехнологічного комплексу.

Головним результатом роботи є: отриманий аналіз сучасного стану використання водню при виробництві скла, та можливість застосування водню для утилізації скидної теплоти при використанні турбоустановки з термосорбційним компресором; розраховані теплофізичні показники ефективності та економічності використання водневого комплексу.

Дипломний проект містить: 72 сторінок, 24 малюнки, 7 таблиць, 29 джерела.

Ключові слова: СКЛОВАРНА ПІЧ, ВОДЕНЬ, МЕТАЛОГІДРИДНА УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОТИ, ТЕРМОСОРБЦІЙНИЙ КОМПРЕСОР, ВОДНЕВА ТУРБОУСТАНОВКА, ЕФЕКТИВНІСТЬ.

РЕФЕРАТ

Дипломная работа выполнена студенткой Недосекиной Юлией Александровной на тему: «Водородный энерготехнологический комплекс для утилизации сбросной теплоты стекловаренных печей»

Объектом исследования дипломной работы является водородный энергетический комплекс, используемый для утилизации теплоты дымовых газов стекловаренных печей, предметом - теоретико-расчётное исследование эффективности использования данного комплекса. Цель работы заключается в расчёте и исследовании теплофизических показателей эффективности использования водородного энергетического комплекса.

Главным результатом работы являются: полученный анализ современного состояния использования водорода при производстве стекла и возможность применения водорода для утилизации сбросной теплоты при использовании турбоустановки с термосорбционным компрессором; рассчитаны теплофизические показатели эффективности и экономичности использования водородного комплекса.

Дипломный проект содержит: 72 страниц, 24 рисунка, 7 таблиц, 24источника.

Ключевые слова: СТЕКЛОВАРЕННАЯ ПЕЧЬ, ВОДОРОД, МЕТАЛЛОГИДРИДНАЯ УТИЛИЗАЦЫЯ ТЕПЛОТЫ, ТЕРМОСОРБЦИОННЫЙ КОМПРЕССОР, ВОДОРОДНАЯ ТУРБОУСТАНОВКА, ЭФФЕКТИВНОСТЬ.

SUMMARY

This degree work is made by student Nedosekina Yuliia Alexandrovna. The topic of the degree work is "Hydrogen energy technology complex for utilization of waste heat of glass furnaces"

The object of the research work is the hydrogen energy complex used for the utilization of the heat of flue gases of glassmaking furnaces, the subject is a theoretical and design study of the effectiveness of the use of this complex. The aim of the work is to calculate and study the thermophysical indices of the efficiency of the use of the hydrogen energy complex.

The main result of the work is: the obtained analysis of the current state of hydrogen use in the production of glass and the possibility of using hydrogen for disposal of waste heat when using a turbo-unit with a thermosorption compressor; Thermophysical indices of efficiency and economy of hydrogen complex use were calculated.

The degree project contains: 72 pages, 24 figures, 7 tables, 24sources.

Key words: GLASS FURNACE, HYDROGEN, METALLOGIDRIDE HEAT UTILIZATION, THERMOSORPTION COMPRESSOR, HYDROGEN TURBINE, EFFICIENCY.

ЗМІСТ

Вступ…….....7

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ СКЛОВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1. Загальна характеристика процесу виробництва скломаси……9

1.2. Призначення та область застосування скловарних печей……12

1.3. Аналіз енергоспоживання в скловарному виробництві……26

1.4. Сучасний стан використання водню при виробництві скломаси……34

2 ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ ЯК РОБОЧОГО ТІЛА В ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

2.1. Водень та його властивості……..38

2.2. Перспективи використання водневих утилізаційних систем в теплотехнологічних промислових комплексах…….……43

3 РОЗРОБКА СХЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ ВОДНЮ

3.1. Інтеграція водневої силової установки в теплотехнологічну схему скловарного виробництва……47

3.2. Основні елементи утилізаційної схеми

3.2.1. Металогідридні компресори та їх застосування…… 51

3.2.2. Воднева турбоустановка……..……55

4 РОЗРАХУНКОВО-ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВОДНЕВИХ ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

4.1. Визначення об’ємів та теплового потенціалу димових газів скловарної печі…….….58

4.2. Визначення основних показників роботи та ефективності роботи водневої теплоутилізаційної системи ……60

4.3 Моделювання тепломасообмінних процесів в металогідридному термосорбційному компресорі ……63
4.4.Визначення ефективності роботи водневої теплоутилізаційної системи……..…..67
Висновки ……70
Список використаної літератури……..….71

ВСТУП

Водень досить широко використовують в багатьох галузях. В останній час його розглядають як універсальний теплоносій та акумулятор енергії. Потреби людства в енергоресурсах кожен рік зростають внаслідок розвитку технічного прогресу, які отримують з невідновлюваних джерел. Таким чином досить доцільно використовувати водень в різних видах діяльності людини, як основний теплоносій або як допоміжний. Використання водню дозволяє зменшити утворення твердих відходів, шкідливих газових викидів. У водневій енергетиці кисень, який утворюється з води одночасно з воднем можливо використовувати в різних галузях промисловості. Тому, водень являє собою екологічно чистий енергоносій.

У скловарному виробництві листового скла використовують водень як захисну атмосферу, тому є можливість установити водневий тепло утилізаційний комплекс, який може відразу вирішити відразу декілька проблем: використання низькопотенційного тепла димових газів, та вдоволення енергетичних потреб виробництва, а це значна економія.

Сьогодні в світі поширюється тенденція переходу до тригенерації – спільного вироблення теплової енергії, холоду та електричної енергії. Цей спосіб обґрунтовано вважається найбільш ефективним з погляду використання хімічного потенціалу первинного палива, а саме такі можливості надають водневі енергоперетворюючі комплекси з термосорбційними компресорами.

Метою дипломного проекту є: розробка воднево-енергетичного комплексу для утилізації скидної теплоти паливних печей скловарного виробництва.

Поставленні завдання:

1. Вивчити сучасний стан використання водню при виробництві скломаси.
2. Розробити схему водневої енергоперетворювальної установки для утилізації скидної теплоти скловарних печей.
3. Провести розрахункове дослідження для визначення основних параметрів теплоутилізаційного комплексу та ефективності його роботи.

У першому розділі детально описано загальна характеристика процесу виробництва скла, види та застосування словарних печей. Проаналізовано енергоспоживання виробництва, та сучасний стан використання водню при виробництві скломаси.

До другого розділу увійшли фізико-хімічні властивості водню. Та можливість використання його у якості робочого тіла енергоперетворювальних установках.

У третьому розділі детально розглянута схема скловарного виробництва, основні елементи утилізаційної системи. Загальні відомості про металогідриди, сфера їх застосування, можливість використання металогідриду для утилізаційного комплексу.

До четвертого розділу входить розрахункове дослідження теплофізичних показників роботи енерготехнологічного комплексу для утилізації скидної теплоти скловарних печей.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ СКЛОВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1. Загальна характеристика процесу виробництва скломаси

Скло є штучний матеріал, який отримується способом переохолодження розплаву незалежно від його хімічного складу та температурної області затвердіння. Має такі властивості як: прозорість, твердість, термостійкість, хімічна стійкість. Оптичні властивості залежать від його прозорості. Завдяки даним характеристикам скло широко використовують у багатьох галузях техніки, науки та побуті.

Скляна промисловість виробляє різні види скла: будівельне, технічно листове, медичне, парфумерне, тарне та сортове скло. А також займається виготовленням спеціального технічного скла: піноскла, скляні волокна, сита, свинцеве скло та різні матеріали на основі скла.

Скло отримують з шихти. Шихта – це суміш природних чи штучних солей, оксидів хімічних елементів. Цю суміш завантажують в піч при певній температурі та витримують деякий час, отримують скломасу. Потім температуру скломаси зменшують, при цьому збільшується в’язкість матеріалу. Що дає змогу формувати вироби різної форми, методами: витягування,прокатки, видування, пресують. Від подальшого застосування скляних виробів залежить його хімічний склад, форма, розмір та метод його виробництва.

Таким чином виробництво скла включає в себе такі технологічні етапи:

1. Підготовка сировини (сушка, подрібнення);
2. Приготування скляної шихти (дозування, змушування компонентів);
3. Варіння скляної шихти до формування скломаси;
4. Охолодження скломаси;
5. Механічна та хімічна обробка виробу.

Більше 90% виготовленого скла в світі виплавляться з содової або сульфатної шихти.

Содова шихта – трьохкомпонентна, складається з кварцового піска SiO_2, соди кальцинованої $NaCO_3$, вапняку чи крейди $CaCO_3$.

Дану суміш у відповідних пропорціях сплавлять при температурі 700 - 800 °С. В результаті взаємодії карбонатів натрію та кальцію з діоксидом силіцію утворився силікат натрію і кальцію

$$Na_2CO_3 + SiO_2 = Na_2SiO_3 + CO_2 \uparrow \quad (1.1)$$

$$CaCO_3 + SiO_2 = CaSiO_3 + CO_2 \uparrow \quad (1.2)$$

При температурі 1200-1300°С силікат натрію та кальцію утворюється сплав:

$$Na_2SiO_3 + CaSiO_3 + 4SiO_2 = Na_2O \cdot CaO \cdot 6SiO_2 \quad (1.3)$$

Скляну масу в розплавленому стані витримують до повного видалення газів.

Сульфатна шихта – чотирьохкомпонентна, складається з кварцового піска SiO_2, сульфата натрію Na_2SO_3, вапняку $CaCO_3$ та вуглецю С.

До складу шихти входить склобій(відходи з виробництва скла), який може складати 30-50 %. Це підвищує ефективність роботи печі.

Якість шихти значно впливає на продуктивність роботи агрегату та якість виготовленого скла. Чім менші частки суміші, тим швидше відбувається плавлення та гомогенізація. На швидкість процесу гомогенізації впливає вміст вологи в піску, якщо більше 1% то пісок піддають сушці ,якщо менше 0,5 - 1% то його зволожують.

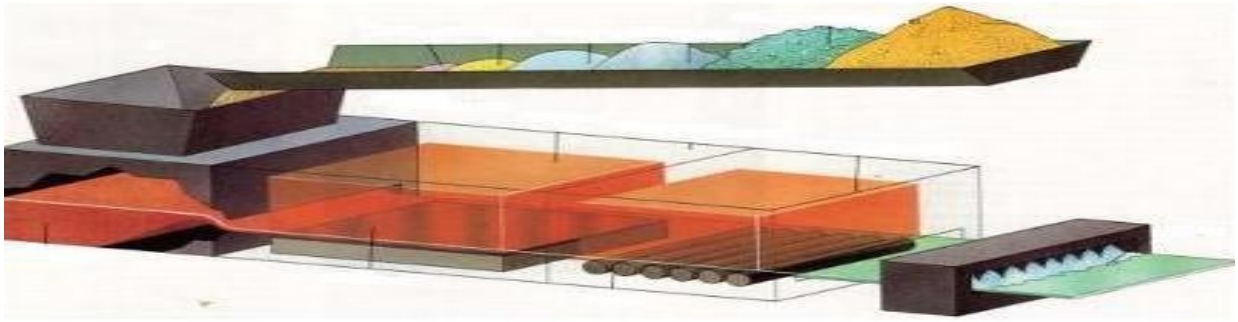


Рис.1.1. Технологія виготовлення скла

Шихтові матеріали завантажують в зону високих температур (1300 – 1500°С), тому одночасно з підігрівом та плавленням починається та закінчується реакції селікатоутворення. Паралельно з процесом селікатоутворенням в шихті, в евтекоїдному селікатному розплаві відбувається виділення вільної і гідратної вологи, окислення металів, видалення борної кислоти, оксидів свинцю, миш'яку,селену та інших, розчинення надлишку кремнезему, висвітлення та гомогенізація скломаси.

Процес розчинення кремнезему досить тривалий, висока в'язкість уповільнює розвиток конвекційних потоків. Тривалість провару по Ф. Солінову визначається максимальною температурою скломаси:

$$\tau = a \cdot b^{-bT}, \quad (1.4)$$

де a та b – сталі, що залежать від хімічного складу та фізичних характеристик шихти (a=50÷200; b=0,2÷0,9) .

Операція висвітлення та гомогенізація скломаси проходить при максимальній температурі, порядку 1600 - 1800°С. Висвітлення – це процес витримки скломаси при високій температурі та механічному змішуванні, шляхом продування різними газами, а також додавання в шихту спеціальних висвітлювачей таких як: сульфату натрія Na_2SO_4 - 0,3 - 0,5 %, азотнокислого калію KNO_3 - до 1%, триоксиду миш'яку As_2O_2 - до 0,2 %, сірчанокислого амонію 0,5 - 1 % $(NH_4)_2SO_4$, кухонної солі NaCl – 1 - 2% та ін.

Останнім етапом є охолодження, пониження температури на 200 - 300°С, зростає рівень в'язкості до значення необхідного до формування виробу. Температура зменшується шляхом зменшення подавання палива, скломаса охолоджується. Потім скломаса перетікає в зону де зовсім припинена подача тепла [1].

1.2. Призначення та область застосування скловарних печей

Конструкції скловарних печей їх розмір, теплотехнічне обладнання, вибір палива, печі для відпалу та загартування залежать від виду скляної продукції, що виготовляється на даному підприємстві. Удосконалення технології скловаріння на прямую залежить нових вогнетривких матеріалів.

Залежно від режиму роботи та розмірів ванн розрізняють скловарні установки періодичної та безперервної дії. Печі періодичної дії використовують для виготовлення невеликих обсягів спеціальних сортів скла, весь процес відбувається в одному об'ємі. Для печей безперервної дії процес відбувається постійно, всі етапи процесу протікають в різних частинах печі. Для даного виду печі виділяють варильну частину (зону варіння та освітлення) і виробничу (зона охолодження). Шихта і склобій завантажується до печі, ця суміш поступово проходить усі зоні циклу і перетворюється в однорідну гомогенну масу.

За типом палива яке використовується для обігріву розрізняють: печі на рідкому паливі, газоподібні та електричні печі.

По використанню тепла відхідних газів: регенеративні (теплообмінник періодичної дії), рекуперативні (теплообмінник безперервної дії – труба в трубі), печі прямого нагріву.

За продуктивністю скловарні печі розподіляють на три групи: великої потужності понад 500 т. на добу, середньої 100 - 500 т. на добу та малої від 2,5 до 100 т. на добу (Таблиця 1.1).

Розподіл скловарних печей за потужністю

Таблиця 1.1

Перша група	Печі продуктивністю понад 500т.на добу. Ванні регенеративні скловарні печі безперервної дії з поперечним напрямком полум'я. Вид палива – газ. Використовують для виробництва листового флоат-скла. КПД складає 33 – 35%.

Продовження таблиці 1.1

Друга група	Печі продуктивністю 100-500т. на добу. Ванні регенеративні газові печі безперервної дії. Залежно від виробництва поділяють на типи: поперечний напрямок полум'я – для виробництва флоат-скла; з підковоподібним напрямком полум'я – для виробництва скляної тари. КПД печей підковоподібним напрямком полум'я складає 40%.
Третя група	Печі продуктивністю 2,5 – 100т. на добу. Невеликі регенеративні скловарні чи рекуперативні ванні газові, електричні печі. Також печі змішаного типу для виготовлення кришталевого, оптичного та інших видів спеціального видів скла. КПД газових печей не перевищує 25%. КПД газоелектричних 35 – 40%. КПД електричних складає65 – 70%.

По пристрою робочої камери скловарні печі діляться на горшкові та ванні.

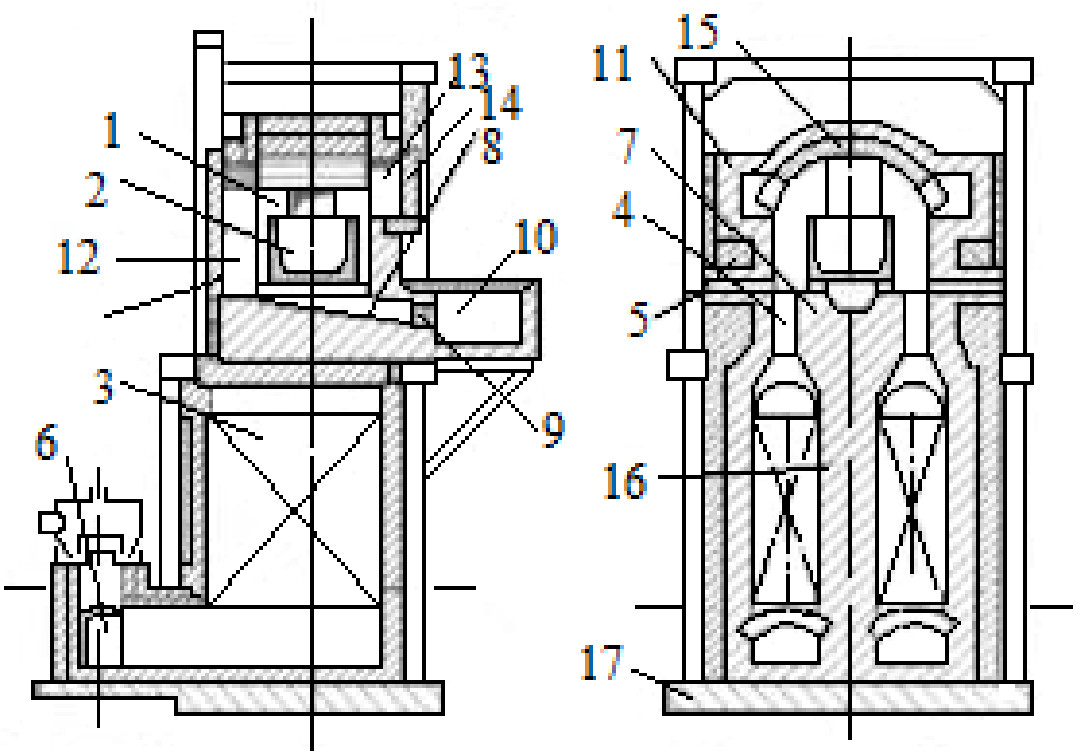
Горшкові печі – це реактори періодичної дії, які виробляють виготовляють високоякісне оптичне, кварцове скло. В горщики с вогнетривкої глини завантажується шихта від 14 - до 1000кг. Схема скловарна установки представлена на Рис.1.2.

При варінні в горшкових печах всі процеси – селікатоутворення, скло утворення, висвітлення, охолодження – чергується. Основним елементом печі є робоча камера, в якій установлюють необхідну кількість горшків. У верхній частині бокових стін розташовані робочі вікна. Навпроти кожного горшка розташовані отвори, через які обслуговують горшки.

Горшки зігрівають до температури 900 – 1200°С та поміщають до печі. Перед варкою скла горшки обпалюють, потім стінки покривають розплавом скла. Всі стадії скловаріння протікають в єдиному об'ємі. В розігріту піч загружають шихту, розплав, що утворюється на поверхні шару, стікає, після чого проварюються нові порції шихти.

Маса змішується завдяки конвекційним процесам, які утворюються в наслідок стікання в глибину більш тяжкої провареної скломаси. К закінченню

проварки відбувається бурління скломаси, після чого температура піднімається до 1500°С, при якій відбувається висвітлення.



1 – робоча камера; 2 – горщик; 3 – повітряні регенератори; 4 – вертикальні канали; 5 – пальники; 6 – борови; 7 – под; 8 – зливний жолоб; 9 – пробка для випуску скломаси (при руйнуванні горщика); 10 – збірник некондиційного скла; 11 – стіни; 12 – садочні вікна; 13 – виробіткові вікна; 14 – засувки вікон; 15 – головний звід; 16 – роздільник стін генераторів; 17 – фундамент печі

Рис.1.2. Схема скловарної установки з регенеративною піччю

Останньою стадією є охолодження, для цього зменшують подачу тепла або зовсім припиняють – відкривають робочі віка. В період вироблення підтримується стабільна температура. Температурний режим варки скла в горшкових печах переставлений на Рис. 1.3.

Скловарні горшки повинні бути високої якості, бо від їх надійності залежить якість скломаси. Найбільш розповсюджений вид браку – це частки шамотного каменю, продукт руйнування стінки.

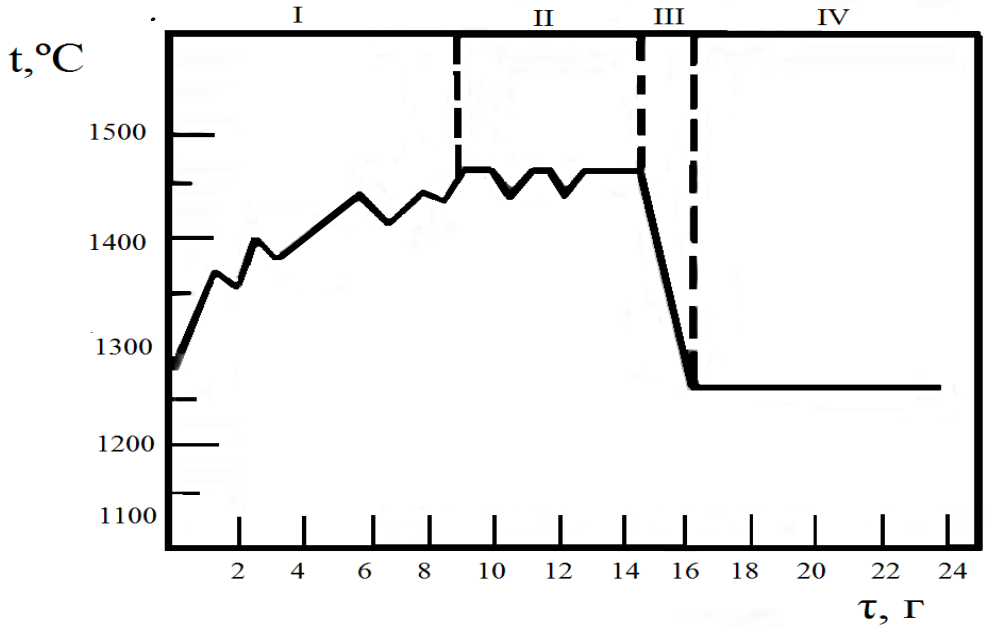


Рис. 1.3. Температурний режим варки скла в горшкових печах:
I – провар шихти; II – висвітлення скломаси;
III – охолодження; IV – вироблення

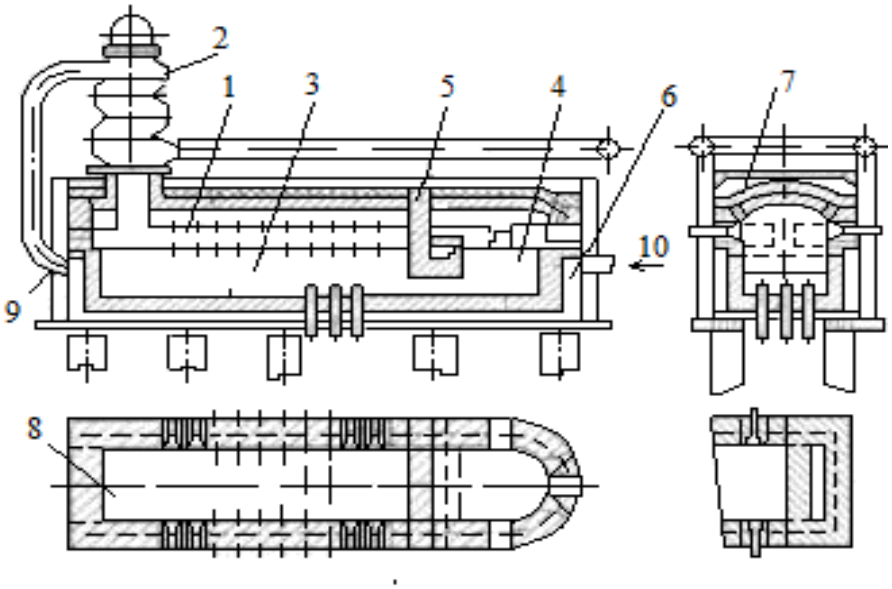
Особливістю горшкових печей є можливість варіння в кожному горшку скло різного складу. Об’єм таких горшиків невеликий: 1-2 т скломаси.

Горшкові печі у зрівнянні з ванними є менш економічними, їх використовують для виготовлення скла особливого складу або кольору.

Ванні печі безперервної дії – є більш досконалі та продуктивні, вони користуються популярністю в скляній промисловості. При варінні всі етапи протікають одночасно і безперервно. Це дозволяє механізувати та автоматизувати процес виробництва. Конструкція та розмір печі залежить від виду скла, що виготовляється.

Ванні печі є основною ланкою промислових установок для виробництва скла для вікон, посуду, склоблоків, склопрокату, а також кришталевого скла.

Ванні вміщають від 50 до 500 кг скломаси. Схема ванної скловарної печі представлена на Рис 1.4.



1 – робоча камера; 2 – регенератори; 3 – варочна частина робочої камери;
4 – виробнича частина робочої камери; 5 - розподільна стіна;
6 – металеві холодильники; 7 – пальники; 8 – торцева стіна; 9 – садочне вікно;
10 – патрубок для введення повітря

Рис.1.4. Ванна скловарна піч

Головною частиною печі є басейн, який складений з вогнетривких брусів. Варильна частина має прямокутну конфігурацію. З одного торця ванни розташована загрузочна кишеня, до якої автоматично безперервно завантажується шихта. Спеціальні прибори реєструють рівень скломаси, якщо він піднявся вище заданого рівня, то завантаження припиняється. В процесі роботи рівень скломаси зменшується, тому система автоматично поновлює загрузки шихти.

Для виготовлення сортового скла використовують ванні печі з протоком, який розміщають в нижче рівня дна варочної частини. З протоку відбирають краще провареннy та охолоджену скломасу.

Різні стадії скловаріння проходять одночасно в різних частинах печі. Основна кількість тепла передається скломасі випромінюванням. Для отримання високоякісної скломаси необхідно підтримувати температурний режим та послідовність процесів. Верхній шар шихти нагрівається до температури 1200 – 1250°С, згодом вся шихта прогрівається і перетворюється в скломасу. Яка гріється до температури 1500 – 1550°С та відбувається висвітлення скломаси. Температурний графік процесу скловаріння для ванної печі показано на Рис.1.5.

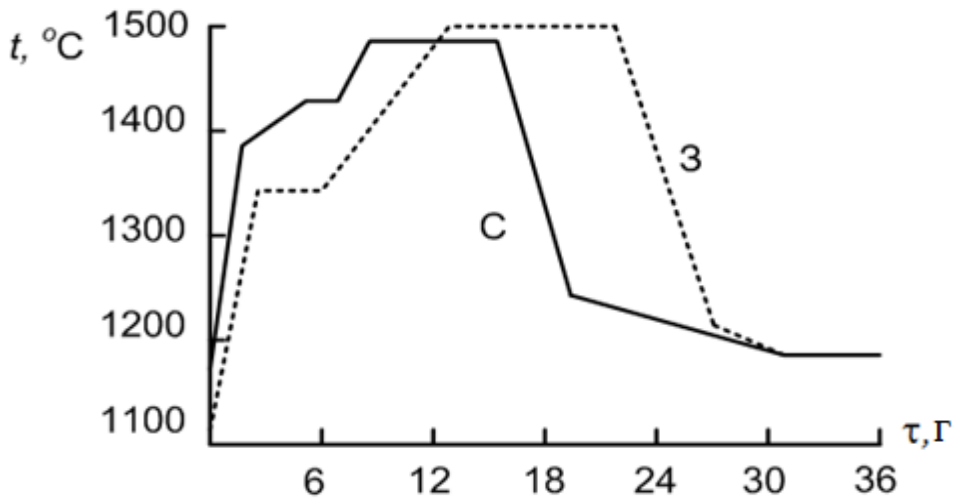
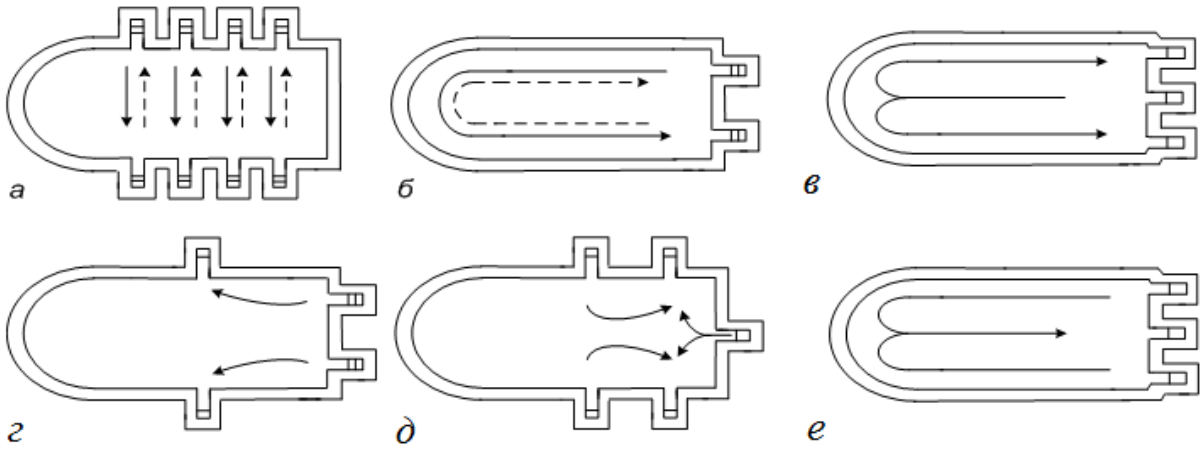


Рис.1.5. Температурний графік процесу скловаріння для ванної печі:
С – сортове скло; З – електровакуумне скло

Залежно від напрямку руху полум’я розрізняють печі: з поперечним, поздовжнім, підковоподібним, комбінованим рухом полум’я. В регенеративних печах використовують поперечний та підковоподібний рух полум’я. В рекуперативних поздовжній та комбінований. Типи скловарних печей представлені на Рис.1.6.

В печах у яких варочна частина більше 50 м^2 використовують поперечне направлення полум’я. Недоліком цієї печі є чутливість до зміни режиму. В печах з меншою площею, від 10 до 50 м^2, використовують підковоподібний рух полум’я. Така форма полум’я дозволяє отримати достатню довжину факелу при малих розмірах варочної зони. Довжина факелу дорівнює подвійній довжині печі.

Важливу роль для даного виду печі грає підбір оптимальної швидкості подачі палива до пальника. Якщо швидкість занадто велика, то факел полум’я довгий, це призводить до завчасного руйнування роздільного екрана.



а – регенеративна піч з поперечним направленням полум’я;

б – регенеративна піч з підковоподібним направленням полум’я;

в – рекуперативна піч з підковоподібним полум’ям;

г – рекуперативна, з повздовжнім напрямом полум'я;

д- рекуперативна, з комбінованим напрямом полум'я;

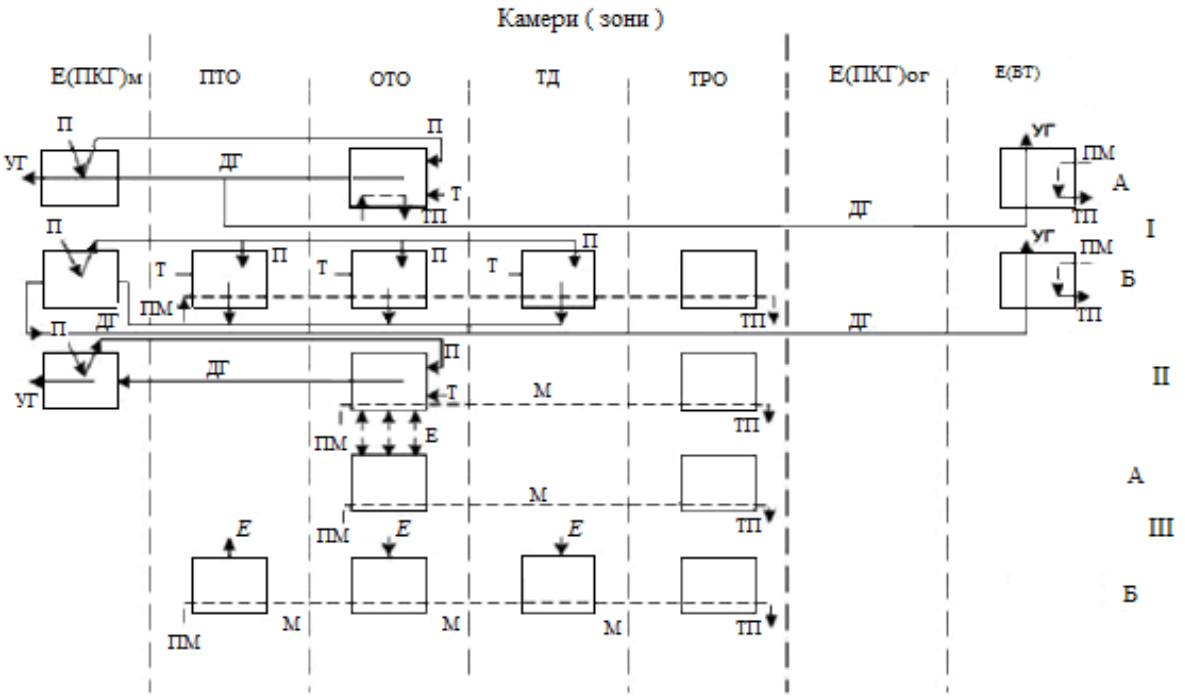
е – рекуперативна піч з підковоподібним полум’я

Рис.1.6. Типи скловарних печей в залежності від напрямку полум’я

Печі середнього розміру є найбільш розповсюдженим типом, з поперечним направленням полум’я. Варочна та виробнича частина розподілені протоком. Розміри варочної басейну складають 50 - 150м^2. Виробнича частина не має самостійного опалення.

Основним видом палива для скляної промисловості є газ, який є більш економічним та екологічним у зрівнянні з рідким паливом. Рідке паливо необхідно попередньо зігрівати до температури 110-120°С, для того щоб знизити в’язкість для заливки в ємності при транспортуванні та розпиленні через

наконечники пальників. Тому газ використовують набагато частіше. На Рис 1.7 наведенні теплові схеми розповсюджених типів скловарних установок.



I – паливні (газові, газомазутні, мазутні); II – електропаливні (електрогазові); III – електричні; А – горшкові однокамерні; Б – ванні (двокамерні, багатокамерні); М – матеріал шихти; ТП- продукт; П- повітря; ДГ – димові гази; Э(ВТ) – електроенергія ; П – паливо; ПМ – початковий матеріал

Рис.1.7. Теплові схеми скловарних установок

Електричні печі для варіння скла є найпродуктивніші та екологічні на даний час. Існує два типи таких печей: вертикальні та горизонтальні – які розрізняються напрямком руху скломаси, від завантаження до вироблення. Найбільш поширені – скловарні печі вертикального типу. Запуск електричної печі здійснюється за допомогою газових пальників. Нагрівання скломаси проходить за рахунок занурення в неї електродів, які розташовані парами з обох сторін варильної зони печі. Температурний максимум знаходиться поблизу електродів, та становить 1500°С. Щоб забезпечити більш рівномірний провар скломаси, що знаходиться над провареним розплавом, використовують завантажувачі з

розрівнюючими пристроями. Шихта поступово плавиться, однак верхній шар залишається слабо нагрітим, випаровування мінімальне, а тому відсутня корозія вогнетривів. Печі прямого нагрівання називають печами з холодним (сводом).

Гаряча скломаса в зоні варіння рухається зверху до низу і потрапляє в пережим між варочною камерою та камерою вироблення. Для підтримання точної температури в зоні вироблення в пережиме ставиться додатковий електрод, іноді застосовують додаткові газові пальники. Залежно від складу скла і окислювально-відновлювальних властивостей використовують оксидо-олов'яні (для варіння кришталю), графітові, молібденові (для варіння листового, тарного, сортового скла) електроди.

Електричні печі застосовують для варіння спеціального скла, оскільки висока вартість електроенергії, хоча теплові витрати в них набагато менші, менша кількість шкідливих викидів, як твердих так і газоподібних [2].

Для подачі газу та повітря застосовують два типа теплообмінників: регенератори і рекуператори.

Регенератор – це камера, всередині якої знаходиться насадка з вогнетривкої цегли з системою отворів (Рис 1.8.). Через насадку зверху в низ проходять відпрацьовані димові гази, цеглини нагріваються і потім віддають тепло повітрю, який рухається знизу вгору, нагріваючи його до 1200-1300°С.

Система перемикає газові потоки так, щоб один пальник працював на горіння палива, а інший на нагрів насадки. Через фіксований проміжок часу відбувається переключення газових потоків, тоді другий пальник спалює паливо, а насадка регенератора першого пальника нагрівається підходящими газами.

Регенератори скловарних печей повинні задовольняти таким умовам: підтримувати постійну акумулюючи здатність вогнетривкої насадки, температуру підігріву повітря в процесі експлуатації; мати термін роботи насадок, що дорівнює терміну праці печі, а якщо це неможливо то гарячий ремонт не повинен впливати на продуктивність та якість продукції [3].

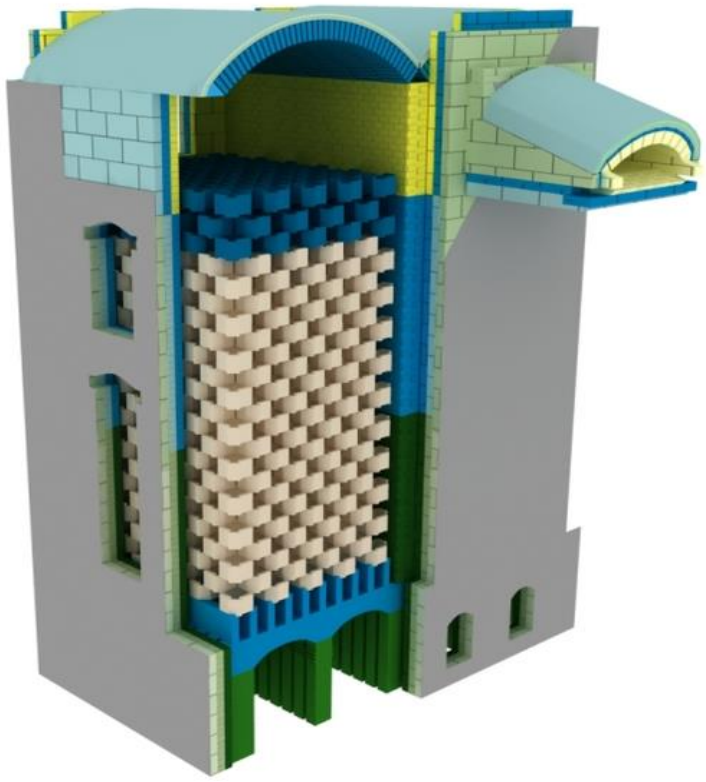
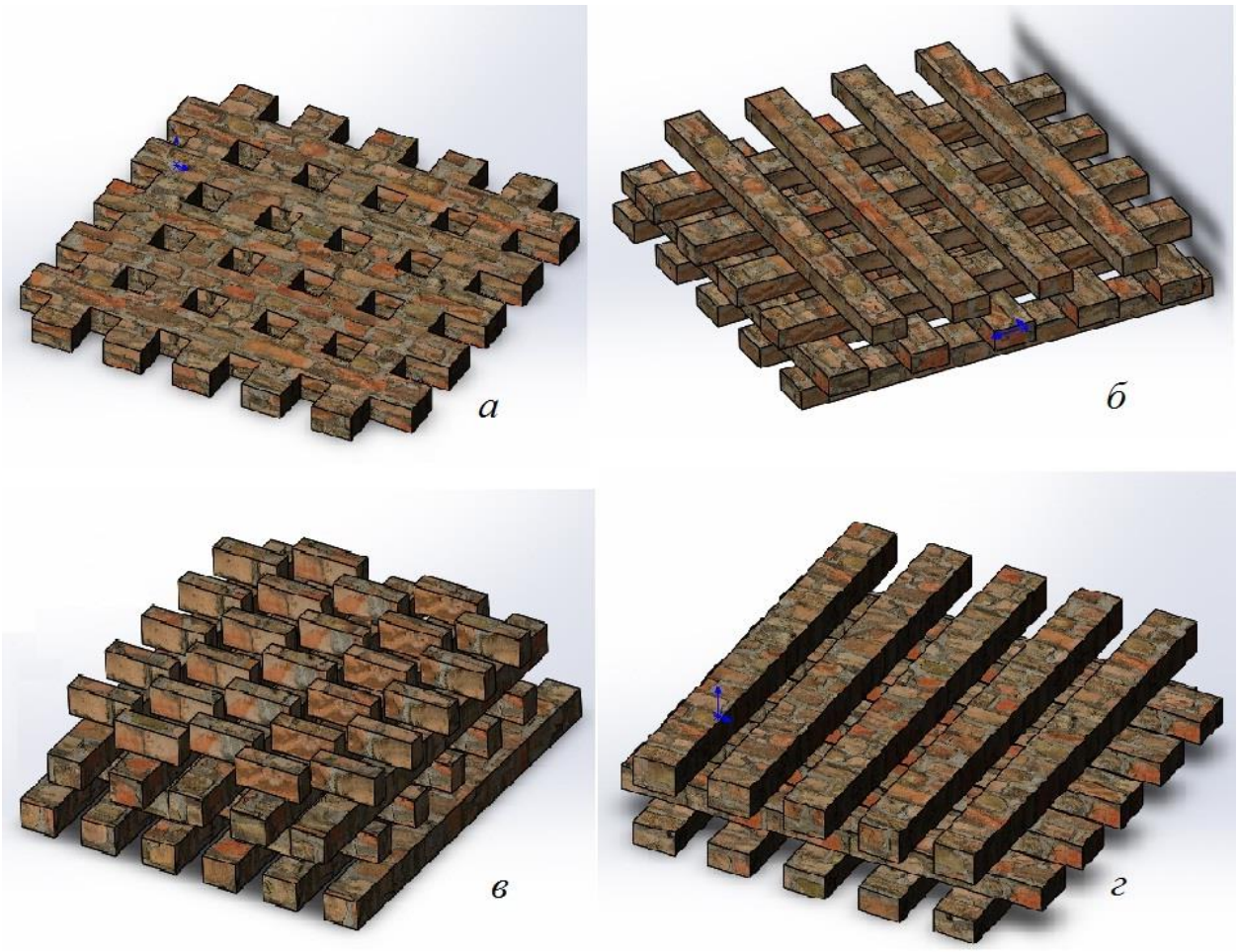


Рис.1.8. Регенеративна камера

Значний вплив на роботу регенератора надає взаємодія регенератора з пилом, який потрапляє з варочної зони разом з димовими газами. На виході з робочої зони продукти горіння мають температуру 1000-1200°С і містять у своєму складі пил шихтових матеріалів та невелику кількість оксидів натрію та калію. Тому верхня частина насадки більш схильна до заростання пилом початкових слоїв кладки.

Для виготовлення насадок регенератора використовують різні види кладки вогнетривкої цегли. Насадки прагнуть виконати з більшою поверхнею нагрівання та хорошим теплообміном між газом/ повітрям та вогнетривом. Але необхідно враховувати можливість запилення газовими потоками. Ширина каналів регенераторів становить 100 – 200мм., при сильній запиленості потоків можуть збільшувати до 300мм. Зменшення каналу призводить до збільшення поверхні тепловіддачі конвекцією, однак зменшує тепловіддачу випромінюванням. Основні види насадок для генератора представлені на Рис.1.9.



а – із суцільними каналами(насадки Каупера); *б* – зі зміщенням, ряди чергуються*;*
в - Ліхте; *г* – без зміщення, ряди чергуються
(насадка Сіменса)

Рис.1.9. Типи насадок регенератора для скловарних печей

Найчастіше використовують насадки Каупера та Сіменса. В насадках Сіменс чергуються паралельні ряди цегли під прямим кутом. Під цеглою та між нею залишаються проходи для газів. При закупорці одного з вертикальних каналів пилом нижня частина насадки продовжує працювати. Даний вид насадки має високий коефіцієнт тепловіддачі та схильність до перегріву та оплавлення цегли при насичені його окисами заліза.

В насадках Каупера поверхнею нагріву є суцільні вертикальні канали з меншою поверхнею теплообміну та збільш низьким коефіцієнтом тепловіддачі.

Вони є більш надійнішими при високих температурах, оскільки повільніше нагрівається і має кращу будівельну міцність. Тому досить часто насадку Каупера використовують для верхніх рядів, а насадку Сіменс – для середніх та нижніх рядів

Для насадок використовують шамотну цеглу. Однак для цього виду матеріалу при нагріванні відбувається осадження з підвищенням температури. Осадження слоїв супроводжується збільшенню швів, що призводить до руйнуванню кладки. Тому шамотну цеглу не використовують при температурі вищою за 1300°С [4].

Рекуператор – це теплообмінник, в якому гази безперервно підігрівають систему подачі повітря на горіння та через неї повітря до температури 800°С. Вони є більш масивними чім регенератори, але з їх допомогою зручніше регулювати температуру у великих та середніх печах.

Схема роботи рекуператора представлена на Рис.1.10.

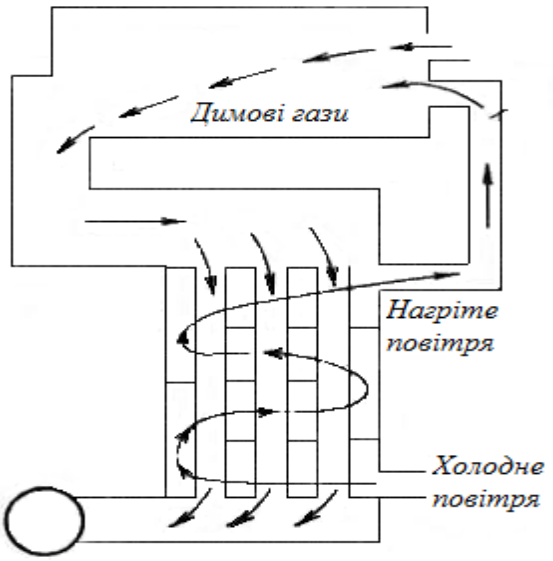
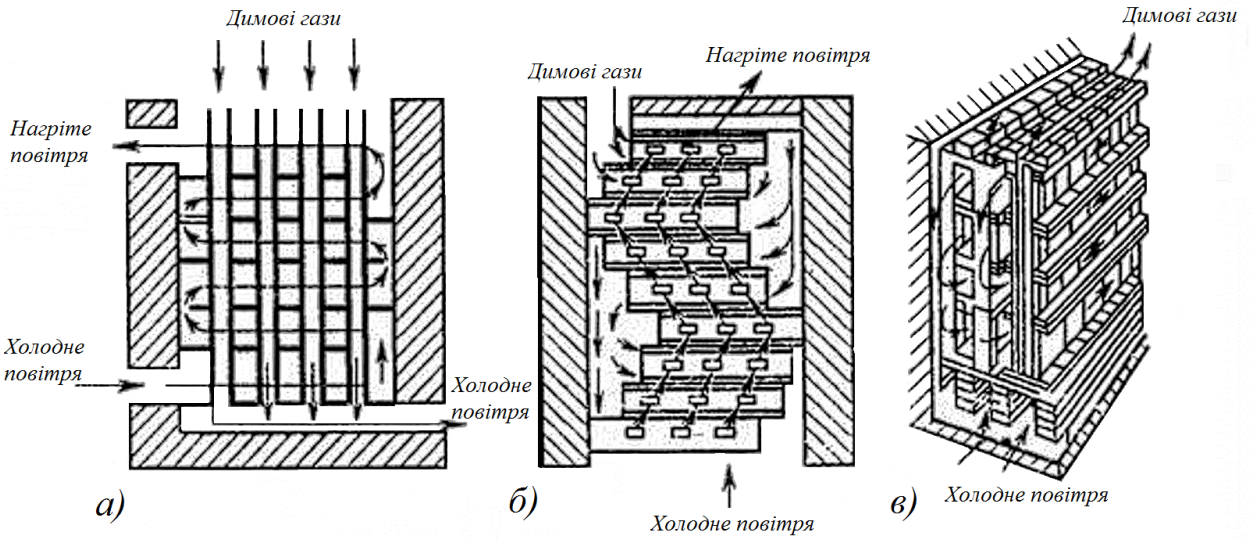


Рис.1.10. Схема роботи рекуператора

Димові гази надходять в рекуператор по каналах, які омиваються повітрям. Нагріте повітря надходить в піч для спалювання газу, а охолоджені гази відводяться в димову трубу. При нагріві повітря в рекуператорах напрямок

полум’я залишається постійним. Режим передачі тепла є стаціонарним. При прямому потоці температура підігріву повітря температура газів, не може перевищувати температуру газів, що відходять з рекуператора. При протилежному потоці повітря є можливість підігріти його до більшої температури, але при цьому максимальна температура стінки буде вищою, будучи проміжною між температурами газів, що відходять та повітрям. Розрізняють керамічні та металеві рекуператори. Керамічні підігрівають повітря до температури 800 - 1000°С (Рис.1.11.). Металеві можуть підігрівати як повітря, так і газоподібне паливо до 500 - 600°С.



а) – вертикальний рух димових газів, рух повітря горизонтальний;

б) – горизонтальний рух димових газів, рух повітря вертикальний;

в) – горизонтальний рух димових газів та повітря

Рис.1.11. Типи керамічних рекуператорів

Керамічні рекуператори виконують з фасонних трубчатих елементів, одноходові чи двоходові. Усередині елементів рухаються гази, зовні омиваються повітрям, або навпаки. Трубчаті елементи виготовляють з шамотних, високоглиноземистих вогнетривких матеріалів.

Перевага рекуператорів перед регенераторами є те, що з їх допомогою забезпечується стабільний температурний режим в печі і вони працюють без

приводних пристроїв. Недоліками цих пристроїв є: нещільність, що не дозволяє підігрів в них горючого газу, досить швидке запилення.

Розглянемо флоат-процес який є найпоширенішим для виробництва листового скла. Флоат-процес – це безперервне цілодобове виробництво. Основний принцип цього процесу заключається в формуванні розплавленої скломаси на поверхні розплавленого олова під дією сил поверхневого натягу.
Велика частина виготовленого листового скла має склад який наведений в Таблиці 1.2.

Таблиця1. 2

Розповсюджений хімічний склад листового скла

Назва компоненту	Масова частка, %
Діоксид кремнію (SiO_2)	71-74
Оксиди натрію та калію	12,5-15
Оксид кальцію (CaO)	6-9
Оксид магнію (MgO)	< 5
Оксид алюмінію (Al_2O_3)	< 1,1
Оксид сірки (SO_3)	< 0,35

Флоат-скло отримують в скловарних печах регенератного типу з поперечним напрямком полум'я. Флоат-ванна складається з металевого корпусу, заповненого оловом. Корпус ванни герметичний, в ньому підтримується захисна атмосфера шляхом заповнення сумішшю азоту та водню. Розплавлена скломаса витікає з печі по каналу, в кінці каналу вона заливається до ванни через спеціальний вогнетривкий переливний вал, який забезпечує її правильне розтікання. Потік регулюють за допомогою підвісного шибера в каналі. В точці де скломаса стикається з оловом, температура олова становить 1000°С, на виході знижується до 600°С. Скломаса проходячи по поверхні олова набуває ідеально рівну поверхню. Далі скло ще в в’язкому стані піддають процесу витягування.

Існують два способи витягування скла: спосіб прямого витягування і спосіб поздовжньо

- поперечного витягування. За першим способом витягування здійснюється дією сил, що передаються від роликів випальної печі. За другим способом розтягування відбувається з допомогою машин для потоншення. Охолодження стрічки скла здійснюється через футеровку ванни та допоміжний холодильних пристосувань. Скло поступово охолоджується від 600°С до 60°С (Рис.1.12.).

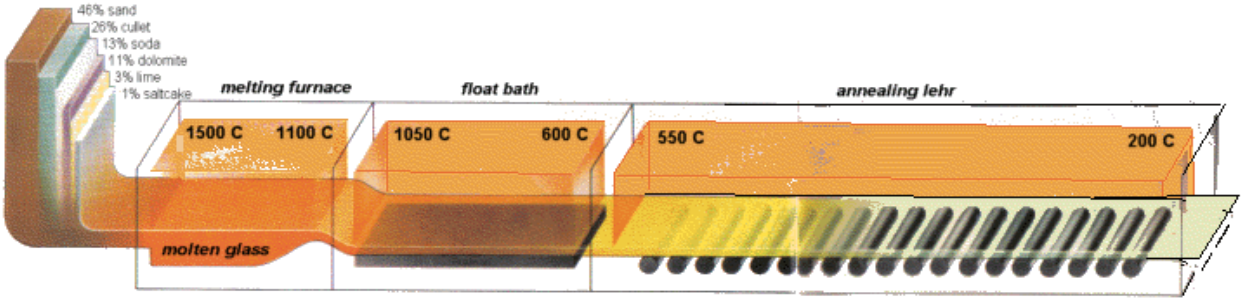


Рис.1.12. Флоат-технологія виробництва скломаси

Охолоджена стрічка скла розрізається роликами які переміщаються на задані форми. Краї стрічки, на яких знаходяться відбитки зубців роликів відрізаються , а залишки повторно використовують в якості склобою. Потім листи потрапляють до складів.

1.3. Аналіз енергоспоживання в скловарному виробництві

У більшості підгалузей скляної промисловості використовують великі печі безперервної дії, термін експлуатації який складає від 5 до 12 років, в деяких випадках до 20 років. Енергоспоживання печі зростає в міру збільшення терміну її експлуатації. Основними джерелами отримання енергії для виготовлення скла є: різні категорії рідкого палива, газ, електроенергія, а також різноманітна комбінація їх. Пряме електричне нагрівання використовують дуже рідко, лише для невеликих ванних та горшкових печей.

Зазвичай 75 % енергії витрачується на процес варіння скла, інша частина йде на загальні потреби виробництва (процес формування, підігрів шихти,

опалення приміщення та ін.). Приклад розподілення енергоспоживання для склотарного виробництва: піч – 72 %, живильники – 5 %, компресори – 5 %, охолодження форм – 3 %, лери – 2 %, решта 7 % (Рис. 1.13.).

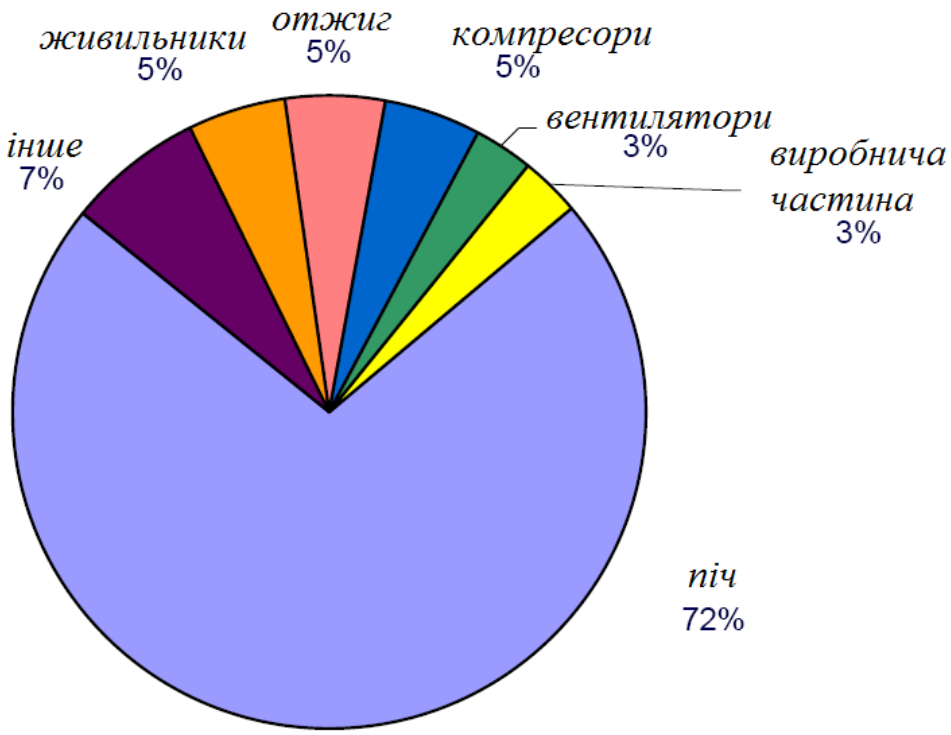


Рис. 1.13. Основні області енергоспоживання

Для галузей скляної промисловості використовують мазут чи природній газ, невелику частку електроенергії до 5%. Живильники та ліри нагріваються з використанням газу, електроенергія використовується для живлення компресорів стиснутого повітря та вентиляторів. Для забезпечення повноцінного функціювання підприємства необхідні насосні станції для води, виробництва пару, для обігріву сховища і мережі подачі мазуту, зволоження шихти, обігріву приміщень. Все це є затратами енергії на виробництво. Для того щоб оцінити енергоспоживання виробництва розглянемо теоретичні затрати енергії на виготовлення різних видів скла (Таблиця 1.3).

Розрахунок заснований на припущенні про повне використання всієї вільної теплоти, яка складається з трьох частин:

1) теплота на реакцію формування скла з сировинних матеріалів;

2) теплота та ентальпія для підвищення температури скла від 20°C до 1500°C;
3) вміст теплоти в газах (в першу чергу в CO_2), що виділяються з шихти при плавленні.

Таблиця 1.3

Теоретично необхідна теплота для виготовлення скла типових складів

Показник	Натрій- кальций-селікатне (листове / тарне скло), ГДж/т	Боро-селікатне скло (8% B_2O_3), ГДж/т	Кришталеве скло (19% PbO), ГДж/т
Теплота реакції	0,49	0,41	0,40
Ентальпія скла	1,89	1,7	1,69
Ентальпія газів, що виділяються	0,3	0,14	0,16
Теоретично необхідна теплота	2,68	2,25	2,25

Реальна потреба в енергії в підгалузях варіює в широких межах від 3,5 до 40 ГДж/т. Ця величина суттєво залежить від конструкції печі, масштабів та методів виробництва. Велика частина скла виготовляється у великих печах, енергоспоживання складає 8 ГДж/т.

Виробництво скла є енергоємним, високотемпературним процесом, тому присутні явні втрати теплоти. Але з кожним роком все удосконалюються заходи енергоефективності, втрати теплоти при експлуатації мінімізують.

Розглянемо фактори які впливають на енергоефективність підприємства:

1. Потужність печі значно впливає на енергоспоживання та тонну провареної скломаси, оскільки великі печі є більш енергоефективні через менше відношення площі поверхні до об'єму.

2. Завантаження печі також впливає,оскільки більшість печей досягає найкращої енергоефективності при максимальному завантаженні. На рис.1.13 ми можемо побачити, що розмір печі та потужність печі значно впливає на енергоефективність. Зміни у використанні продуктивності печі в основною мірою визначаються ринковими потребами і можуть бути значними, особливо для певних категорій тарного і сортового скла.
3. Старіння печі сприяє зниженню теплової ефективності. Під кінець терміну експлуатації печі енерговитрати збільшуються на 20% в порівнянні з початком.
4. Використання склобою істотно знижує споживання енергії,оскільки хімічна енергія яка необхідна для сировинних матеріалів вже поглинена. Це дозволяє знизити витрати енергії на варку скломаси на 2 - 3%.
5. Використання електропідігріву підвищує ефективність печі. Але якщо урахувати витрати на електроенергію та ефективність і розподілення енергії, загальна економія становиться не значною. Цей метод використовують для підвищення ефективності праці печі, а не як метод підвищення енергоефективності.
6. Примусове кисневе дуття може знизити споживання енергії. Цей спосіб особливо використовують для невеликих печей. Видалення основної частини азоту з атмосфери згорання зменшує обсяг димових газів на 60 - 80%. При цьому не має необхідності підігріву азоту до температури полум'я.

Існують різні методи вирішення питання зниження питоме споживання електроенергії, їх розподіляють на дві категорії: оптимізація споживання енергії при підтриманні загального рівня виробництва; підвищення виробництва за рахунок зменшення кількості браку та відходів [5].



Рис.1.14. Залежність питомого енергоспоживання на скловаріння від завантаження сировина

Основні методи вирішення питання енергоефективності можемо розділити на три групи (Таблиця 1.4).

Таблиця 1.4

Методи вирішення питань енергоефективності

I - група	Удосконалення вже існуючих печей, регенераторів, опираючись на вже існуючий досвід в скляній промисловості
II група	Загальні методи зниження енергоспоживання, які передбачають звернення уваги витрати енергії під час процесу виробництва (використання стиснутого повітря, звернення уваги на електрозабезпечення, освітлення)
III група	Удосконалення, які потребують значних капітальних вкладень, та істотних змінень в процесах виробництва

До першої групи можемо віднести:

- ❖ теплоізоляція печі;
- ❖ ущільнення кільця на пальниках;

- теплоізоляція регенераторів.

Покращення теплоізоляції печі.

Значні втрати теплоти притаманні печі близько 35 % загального споживання енергії на скловаріння, тому зменшення навіть на 1-2 % відсотки є досить доцільним. Ізоляційний матеріал повинен бути досить щільним та мати можливість нанесення на гарячий звід печі, з утворенням монолітного слою покриття. Це дозволяє скоротити витрати на паливо на 3-5 %, при цьому продуктивність печі не змінюється.

Ущільнення кільця на пальниках

При стандартному розташуванню пальників може відбуватись потрапляння холодного повітря до печі через отвори для пальників. Холодне повітря не враховується в тепловому балансі печі, що призводить до зменшення ефективності регенераторів. Ущільнення кільця на пальниках, виключає занос холодного повітря та виключає втрати теплоти через отвори. Це дозволяє скоротити витрати енергії на скловаріння до 7 %, а також зменшити кількість кисню в зоні варіння, і відповідно до зниження викидів NO_x від 5 до 25 %.

Теплоізоляція регенераторів.

Нанесення ізолюючих матеріалів на регенератор з метою зменшення потрапляння повітря з зовні. Для цього застосовують розпилення матеріалу на зовнішню частину шаром в 50мм., це дозволяє зменшити затрати на енергію.

До другої групи можемо віднести:

- контроль якості на «гарячому кінці» процесу;
- використання стиснутого повітря;
- двигуни з регульованою продуктивністю;
- високоефективні електродвигуни;
- Освітлення, опалення та гаряче водопостачання.

Контроль якості на «гарячому кінці» процесу.

Контроль якості на «гарячому кінці» процесу дозволяє виявити та запобігти випуск бракованих партій виробів, практично відразу після виготовлення, це

набагато вигідніше і практичніше, ніж чекати доки вироби пройдуть всі етапи контролю на «холодному кінці». При цьому набагато легше оцінити результати коригуючих операцій внесених під час процесу. Це дозволяє значно знизити затрати енергії.

Використання стиснутого повітря.

Стиснуте повітря забезпечує процес виробництва скляної продукції. Його використовують на різних етапах створення скляної маси, під час процесу видувки та заготуванню матеріалу. Основні методи поліпшення енергоефективності такі: компресор повинен відповідати технологічним вимогам; необхідні методи контролю та ліквідації витоків (утечек); своєчасний ремонт та якісне обслуговування.

Електродвигуни із змінною швидкістю і високоефективні мотори.

Мотори, що забезпечують плавне регулювання швидкості, можуть використовуватися у всіх випадках, коли двигуни працюють з рідкими або газоподібними середовищами - в вентиляторах, насосах, компресорах і в ході процесу несуть змінне навантаження. Такі системи дозволяють змінювати швидкість мотора за рахунок частотного перетворювача, дозволяючи економити енергію за рахунок зниження непродуктивних витрат.

Зазвичай, якщо необхідна навантаження менше потужності вентилятора, доводиться використовувати механічний засов.. Що призводить до падіння тиску, це збільшує енергоспоживання. Замість механічних (заслонок) слід використовувати частотні перетворювачі, які дають можливість регулювати швидкість індукційних двигунів змінного струму. Такі системи дозволяють регулювати потоки повітря, даючи при низькому навантаженні зниження споживання електроенергії.

Освітлення, опалення та гаряче водопостачання.

Методи економії передбачають перехід на енергоефективне обладнання для освітлення. Опалення приміщень може здійснюватись за рахунок теплоти, що відходить від печі. На невеликих підприємств з використанням рекуператорів, за рахунок теплоти газів, що відходять, є можливість повністю покрити потреби в

опаленні приміщень та гарячому водопостачанні. На великих заводах кількість теплота від газів перевищує потреби споживання на опалення, тому існує необхідність в установленні котлів, які будуть утилізовувати залишки тепла.

До третьої групи можемо віднести:

- ❖ утилізація тепла газів, що відходять;
- ❖ примусове кисневе дуття;
- ❖ виробництво теплової та електричної енергії.

Утилізація тепла газів, що відходять.

Утилізація теплоти відхідних газів здійснюють за допомогою регенераторів та рекуператорів. Але значна частина теплоти все ж втрачається. Процес скловаріння супроводжується значними викидами димових газів з температурою 350-600°С для печей регенеративного типу та температурою до 900°С для печей рекуперативного типу. Теплова енергія димових газів складає 25-40% від загального енергоспоживання піччю. Тому використовують різні прилади які основані на організації процесу теплообміну між газами та середовищем, це може бути повітря,вода або інші теплові носії.

Примусове кисневе дуття.

Використовують заміну повітря на кисень, чистотою більше 90%. Видалення основної частини азоту з атмосфери горіння веде до зменшення димових газів на 75 - 80%. Чим чистіший кисень використовують тим менша кількість димових газів. При цьому відбувається економія енергії, оскільки не має необхідності нагрівати азот до температури полум'я. Економія енергії для малих печей може складати 50%, для середньої рекуперативної печі 25 - 35%. Однак для великих регенеративних печей з оптимізованими тепловими характеристиками економія буде набагато меншою 5 - 10%.

Виробництво теплової та електричної енергії.

Високотемпературні гази з регенераторів та рекуператорів можуть бути використанні для виробництва теплової енергії та електроенергії. В результаті паливо, що затратилось на процес виробництва використовується більш ефективно. ККД спаленого палива зростає з 30% до 89 %.

Напрямки використання застосування отриманої теплової енергії: теплова обробка стекловолокна; попередній підігрів шихти; гранулювання шихти; от жиг скла; осушка осаду стічних вод; попередній підігрів газів, що надходять в регенератор чи рекуператор; обігрів приміщень [6].

Виробництво електроенергії забезпечується за допомогою парових турбогенераторів. Яка потім використовується на потреби виробництва.

1.4. Сучасний стан використання водню при виробництві скломаси

При виробництві листового скла використовують флоат-метод виробництва, який було розглянуто в розділі 1.2. Процес формування стрічки скла на розплаві металу проходить в ванні розплаву, яка містить шар розплавленого металу та захисну атмосферу, що складається з азоту та газу-відновлювача – водню. Подача цієї суміші до ванної відбувається через її склепіння. Це викликано тим, що у ванні розплаву неминуче присутній кисень, який проникає з навколишнього середовища. Ванна не може бути герметичною, оскільки флоат-процес передбачає подачу рідкої скломаси з скловарної печі через вихідний технологічний отвір та вивід сформованої стрічки скла через вихідний технологічний отвір. Крім того, при перестановці технологічного обладнання в ванні виймаються і знову встановлюються бічні ущільнюючі вставки, знімаються оглядові вікна. Також присутня дифузія кисню в ванну розплаву на молекулярному рівні через герметизуючі матеріали, якими замазують щілини ущільнюючих вставок і оглядових вікон. Кисень до ванни надходить з скломасою.

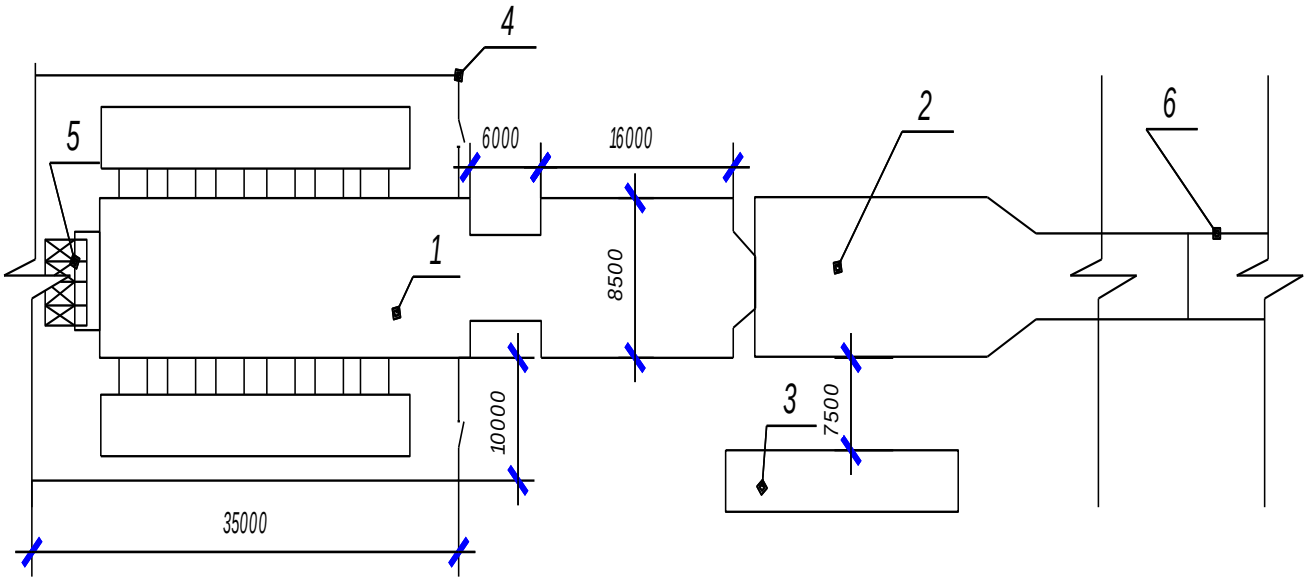
Стрічка скла нижньою частиною контактує з ідеально гладкою поверхнею розплавленого металу та піддається дії вогневої поліровки зверху, завдяки цьому досягається висока якість поверхні листового скла. Метал для розплаву повинен відповідати наступним критеріям: бути рідким при температурах 600 - 1050°С; повинен мати щільність більшою за щільність скла, більше 2500кг/м^3, щоб

утримати стрічку скла на поверхні; пружність пари при 1027°С повинна бути меншою 13,33Па. Всім цим умовам відповідає олово Sn. Його температура плавлення 232°С, температура кипіння 2623°С, густина при 1050°С становить 6500кг/ м^3, а пружність пари при 1027°С дорівнює 0,25Па.

Ванна розплаву має вогнетривку футеровку, виконану з шамотних брусів. Вогнетриви зводу кріпляться до рами кожуха. Стадії процесу формування стрічки скла на розплаві металу:

- ❖ регульована подача скломаси на поверхню розплавленого металу;
- ❖ активне формування;
- ❖ охолодження готової стрічки.

По довжині ванна розплаву розподілена на 16 технологічних зон: 8 широких, 3 середніх та 5 вузьких.



1 – скловарна піч; 2 - ванна розплаву – формування стрічки скла; 3 - пост автоматичного управління процесами; 4 - металева огорожа; 5 - завантажувачі шихти з установленими циклонами; 6 - піч відпалу стрічки скла

Рис.1.5. Флоат-технологія виробництва скломаси

Товщину і швидкість формування стрічки скла регулюється за допомогою розтягуючих пристроїв. У бічних стінках кожуха зводу є вікна для вставки та виймання нагрівачів. У бічних стінках між басейном і підвісною стіною є проміжок, заповнений герметизуючими вставками. Основне тепло в ванну вноситься скломасою, яка надходить з скловарної печі. Температуру в процесі формування стрічки скла регулюють електричними нагрівачами, розташованими на спеціальній кераміці.Розглянемо способи та обладнання для отримання захисної атмосфери для виробництва листового скла.

Станція отримання азотно-водневої суміші (АВС).

Вона складається з 8 установок АВУ-450 загальною потужністю 3600м^3/ч. Станція призначена для виготовлення азотно-водневої суміші, що містить від 2 до 12% водню, 0,0005% кисню, CO_2 – 0,005%, CO – 0,01%, NO - 0,0001%, вміст азоту 76 - 86 %. Тиск на виході зі станції становить до 0,3МПа.

До цеху АВС подається природній газ та компресорне повітря з тиском до 0,6МПа. За допомогою регулятора Казанцева тиск знижується і утримується до робочого 0,09МПа. Далі газ очищається від домішок сірки та сірчистих сполук. Очищений природній газ подають через інжекційний пальник до змішувача камери спалювання, туди ж подається компресорне повітря. Продукти спалювання з камери подаються в конвектор, де відбувається окислення окису вуглецю до його двоокису. Отриманий газ подається на адсорбер для очищення від двоокису вуглецю та вологи.

Захисна атмосфера повинна відповідати наступним вимогам за вмістом газів та домішок:

- азот – 84 - 99%;
- водень – 1 - 16%;
- кисень не більше 0,0005%;
- волога – 0,001г/м^3.

Воднева станція.

Станція призначена для отримання водню та оснащена 8 електролізерами СЗУ- 40 з продуктивністю 40м^3/год кожен. При електролізі води виділяється водень і кисень, який разом з циркулюючим в системі електролітом надходить до розподільної колонки, яка призначена для відведення газів від лугу, охолодження електроліту та забезпечення його безперервної циркуляції. Після розподільної колонки гази надходять в промивачі, де очищуються від лужного туману та охолоджуються. Отриманий водень подається на очищення від кисню, яка здійснюється за допомогою паладієвого каталізатора в контактному апараті. На поверхні каталізатора кисень, який міститься у водні, реагує з воднем, утворюючи воду. Температура в контактному апараті не повинна знижуватись нижче 100°С , бо відбувається конденсація водяних парів на каталізаторі.

Перед подачею водню на першу ступінь осушки його необхідно охолодити за допомогою холодильників та волого віддільників. На першому ступені осушення водню здійснюється в відрегенерованому адсорбері з силікагелем. Гарячий водень проходить знизу вгору через шар силікагелю, десорбуючи з нього вологу. Далі він охолоджується та позбавляється залишків вологи. На другій ступені осушки водень надходить до осушувального балону заповненого цеолітом. У адсорберах здійснюється глибоке осушення водню, а також очищення від CO та CH_4. Через фільтри очищений і осушений водень подається в газгольдери, а звідти споживачеві.

Типовий флоат-резервуар споживає в середньому 1200 – 1500нм^3/год азоту та 60 – 100нм^3/год водню високого ступеня чистоти. Чим більша кількість сірки міститься в склі, тим більше водню необхідно використовувати [7].

2 ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ ЯК РОБОЧОГО ТІЛА В ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

2.1. Водень та його властивості

Водень є одним з найпоширенішим елементів на Землі та по за її межами. У середньому вміст водню в атмосфері поблизу земної поверхні складає $5 \cdot 10^{-5}\%$, тобто в вільному стані він зустрічається дуже рідко. В природі водень знаходиться в з'єднаному стані з багатьма елементами: киснем, сіркою, азотом, хлором, рідше з фосфором, бромом та інишими елементами. У вільному стані його виявляють в місцях зародження різних солей, кам'яному вугіллі, гірській породі метеоритах, також він входить до складу вулканічних газів. Припускають, що газоподібний водень, який потрапляє до атмосфери відразу випаровується, оскільки віз в 14 разів легше повітря. В верхніх шарах атмосфери водень взаємодіє з озоном O_3, чи з радикалами типу ОН з утворенням молекул води.

Існує три агрегатні стани водню: твердий, рідкий, газоподібний. В газоподібному стані являється самим легким газом, в двох інших – найлегші рідина та кристал.

Рідкий водень як і інші рідкі палива (гас, вуглеводні та їх з'єднання) використовують якості горючого для реактивних двигунів. Він являє собою безкольорову рідину густиною 71кг/м^3 (при - 253°С), температура плавлення - 259°С, а температура кипіння - 252,8°С. Зберігають рідкий водень в скрапленому стані в кріогенних резервуарах, водневих акумуляторах. Газоподібний водень не має кольору , смаку та запаху, його зберігають в балонах, газгольдерах,в підземних виробках в стиснутому стані. Твердий водень представляє собою снігоподібну масу, кристали гексагональної сингонії. Його температура плавлення - 259,2°С, густина 80,8кг/м^3 при температурі в - 262°С.

Водень в стандартних умовах являє собою хімічно інертну речовину. В хімічних реакціях може виступати як відновник так і окисник. Молекулярний водень нетоксичний, не має запаху, смаку та кольору. Внаслідок малої

молекулярної маси водень має гарні дифузійні та енфузійні властивості. В широкому діапазоні температур має хорошу теплопровідну здатність, наприклад при температурі 25°С та при атмосферному тиску в 7 разів більше, ніж у повітря. Водень проводить тепло в сім разів краще повітря. При підвищенні температури може вступати в з'єднання з багатьма елементами. Його реакційна здатність зростає під дією ультрафіолетового випромінювання, електричної іскри чи електророзряду, при наявності каталізатору, під дією елементарних частинок атомного розпаду. Без нагріву водень реагує лише з фтором та хлором (при наявності світла).

Таблиця 2.1

Розглянемо фізико-хімічні властивості водню

Хімічна формула		H_2
Агрегатний стан	при 0°С	газ
	при -252,8°С	рідина
	при 262°С	тверде тіло
Густина, кг/м³	при 0°С	0,008987
	при -252,8°С	70.8
	при -262°С	80.8
Температура, °С	плавлення	-259,337
	кипіння	-252,8
	критична	-240
Теплота, кДж/моль	плавлення	0,117
	випаровування	0,916
	горіння	285,98
В'язкість, Па·с	при 0°С	$8{,}94 \cdot 10^{-6}$
	при -252,8°С	$14 \cdot 10^{-6}$
Теплопровідність, Вт/(м·К)	при 0°С	0,1815
	при -252,8°С	0,100
Питома теплота згоряння, Дж/кг		$120{,}9 \cdot 10^{6}$

Водень використовують в різних галузях промисловості та в новій техніці в якості реагенту та теплоносія. Сировиною для отримання водню слугує органічне

томливо (природний газ, кам’яне вугілля, горючі сланці) та вода, запаси якої необмежені та відновлювальні, оскільки водень при окиснені перетворюється на екологічно чисту воду. Однак технології його отримання газоподібного водню енергоємні, тому використовують теплову та електричну енергію, також відновлювальні джерела енергії. Розроблено декілька різних видів добування у промисловості, причому використовують дешевший найдоцільніший з них. Основна частина способів добування ґрунтується на принципі відновлення водню з хімічних сполук. Методи отримання водню представлені на схемі (Рис.2.1.)



Рис.2.1. Методи отримання водню

Розглянемо основні параметри цих методів.

Парофазна конверсія метану.

Цей спосіб являється найбільш масштабним та екологічно рентабельним виробництвом. З допомогою цього метода отримують близько 50 млн. т водню в

світі. Конверсія метану, який містить 88 - 95% метану та 3 - 8% етану, здійснюється при температурі вище 600°С .

$$CH_4 + H_2O \xrightarrow[Ni]{900^\circ C} 3H_2 + CO \quad (2.1)$$

Теоретично на отримання 1.т водню конверсією природного газу необхідно затратити 2.5т. метану. Однак реальні затрати газу набагато більші, тому з економічної точки зору доцільніше в якості палива використовувати вугілля.

Конверсія водня з кам'яного вугілля.

Цей процес також називають «процесом Боша» - отримання водяного газу. Це відбувається в дві стадії. На першій водяний пар пропускають над розпеченим коксом чи вуглем до температури 1000- 1100°С

$$C + H_2O \xrightarrow{1000^0 C} H_2 + CO \quad (2.2)$$

Потім монооксид вуглецю окислюють в діоксид вуглецю, пропускаючи суміш водяного газу з залишком водяного пару над нагрітим до 400 - 450°С каталізатором Fe_2O_3

$$CO + (H_2) + H_2O \xrightarrow[Fe_2O_3]{450^0 C} H_2 + (H_2) + CO_2 \quad (2.3)$$

Термічний розклад вуглеводнів

В основі цього термічного розкладу метану лежить дана ендотермічна реакція

$$CH_4 \rightarrow C(\text{тв.}) + 2H_2 - 74,8 кДж \quad (2.4)$$

При цьому отримуємо вуглець в двох його модифікацій – сажі та (пироуглерод). При забезпеченні гомогенного розкладу метану утворюється сажа, а при гетерогенному розкладу - пірографіт, який покриває реакційні поверхні. Вихід сажі складає 40%, її використовують в езино технічній промисловості, при виробництві пластмас та полімерів, графітових виробів, в хімічній галузі. Реакція розкладу метану протікає з поглинанням теплоти 74.8кДж/моль CH_4, та при температурі близькою до 1000°С.

Електроліз води та пару.

Розрізняють два способу отримання електролітичного водню: електролізом водних розчинів КОН чи NaOH при температурі ≤ 100°С; електролізом гідрованого розплаву гідроксида калія при температурі 280 - 350°С, та при 900 - 1000°С у разі використання твердих оксидів електролітів.

$$2NaCl + 2H_2O \rightarrow H_2 \uparrow + 2NaOH + Cl_2 \uparrow . \quad (2.5)$$

Отриманий водень має високу чистоту до 99,99%. Найбільшою перевагою є невичерпність сировинного ресурсу[8].

Фотоліз води з отриманням водню та кисню.

Енергія Сонця яка надходить на поверхню Землі складає 0,14Вт/см^2. Цю енергію є можливість перетворювати за допомогою сонячних установок. При використанні концепції сонячно-водневої енергетики використовують два способу: перетворення енергії Сонця – шляхом фотоелектроліза води в сонячних енергетичних установках, які забезпечують окреме отримання водню та кисню (Рис.2.2.); та використання фото напівпровідників з отриманням електроенергії з подальшою її конверсією в водень шляхом електролізу води (Рис. 2.3.)

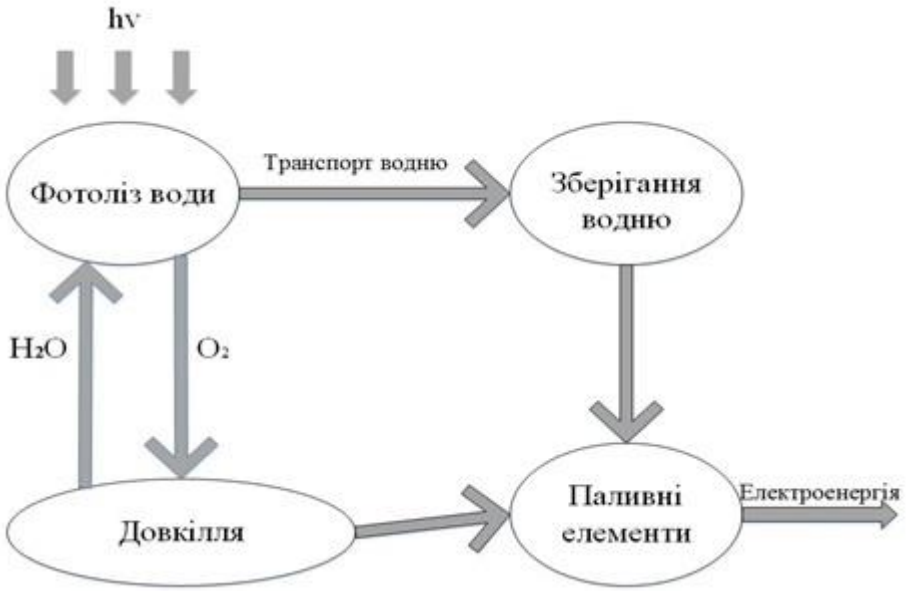


Рис.2.2. Схема фотоелектроліза води в сонячних енергетичних установках з роздільним отримання водню і кисню



Рис.2.3. Схема сонячної енергетичної установки для отримання електроенергія з подальшою її конверсією в водень шляхом електролізу води

Використання водню як енергоносія дозволяє розглядати та вирішувати не лише енергетичні проблеми , а й екологічні. Використання водню дозволяє зменшити утворення твердих відходів, шкідливих газових викидів. У водневій енергетиці кисень, який утворюється з води одночасно з воднем, можливо використовувати для біохімічної очистки стічних вод, в якості окисника при при спалюванні твердих відходів. Кисень, який отримуємо як побічний продукт, в комплексі з енергетитичним використанням водню широко застосовують в металургії, хімії та інших галузях промисловості, що дає змогу отримати гарний економічний ефект [9-10-11].

2.2. Перспективи використання водневих утилізаційних систем в теплотехнологічних промислових комплексах

Найбільш поширеним засобом використання теплового потенціалу димових газів, що відходять, є доповнення теплотехнологічних схем високотемпературних

установок додатковими утилізаційними агрегатами. Це надає можливість отримати крім гарячого повітря, пару технологічних або енергетичних параметрів, холод в абсорбційних холодильних установках, електроенергію або механічну енергію для приводу компресорів та вентиляторів.

Генерація водяної пари в котлах-утилізаторах при температурі димових газів менш 400°С є досить проблематичною. Тому найбільш часто ця теплота застосовується для підігріву повітря горіння або штучного газоподібного палива (наприклад, доменного газу, що застосовується в якості палива для доменних повітронагрівачів).

Але найбільш ефективним з точки зору більш повного застосування енергетичного потенціалу палива є використання утилізаційних схем з когенерацією, тобто з одночасним виробленням електричної та теплової енергії. Істотнім недоліком таких схем є великі розміри турбомашин та турбоприводів, наявність в них значної кількості додаткового обладнання – конденсаторів, ежекторних та деаераційних установок та ін. Альтернативою традиційним паровим турбінам є застосування в якості робочого тіла низкокиплячої рідини. Перевагою при цьому є можливість використання теплоти з низьким температурним рівнем, але досить велика вартість робочого тіла в багатьох випадках призводить до низької економічної ефективності роботи таких схем.

Для замкнених циклів термодинамічна ефективність в значній мірі залежить від вибору робочого тіла. Із зменшенням атомності зростає показник адіабати, і як наслідок, термічний ККД. Тому використання водневих турбін для когенераційних установок є в даному випадку досить перспективним. Більш низька вартість водню та його висока термодинамічна ефективність є передумовою розгляду його в якості робочого тіла утилізаційних силових установок.

Сьогодні в світі поширюється тенденція переходу до тригенерації – спільного вироблення теплової енергії, холоду та електричної енергії. Цей спосіб обґрунтовано вважається найбільш ефективним з погляду використання хімічного потенціалу первинного палива, а саме такі можливості надають водневі

енергоперетворюючі комплекси з термосорбційними компресорами.

З огляду на значні обсяги вторинних енергетичних ресурсів на промислових підприємствах, актуальною є проблема утилізації низькотемпературних теплових вторинних енергоресурсів (ВЕР), що потребує встановлення додаткового утилізаційного обладнання при рівні температур викидних газів 400 – 600К. Технічні можливості теплоенергетичних установок, спосіб роботи яких базується на властивості оборотних металогідридів поглинати водень низького тиску і виділяти його при нагріванні під підвищеним тиском, відкривають принципово новий шлях створення енергетичних установок, що зможуть забезпечити отримання різних видів енергії за рахунок споживання теплоти низького температурного потенціалу.

Втілення новітніх науково-технічних пропозицій та технологічних рішень по створенню нового типу компресорного устаткування та високоефективних водневих турбоперетворювачів відкривають перспективи розробки широкого кола спеціалізованих теплоенергетичних установок, що дозволить підвищити рівень використання низькопотенційної теплоти на енергетичних підприємствах України і створить реальні передумови для зменшення енергоємності виробництва та теплового забруднення навколишнього середовища.

Відомо, що використання водню в якості робочого тіла в теплоенергетичних установках є більш переважним, ніж багатоатомних газів [12]. Легкі гази мають теплофізичні властивості, які можуть забезпечити мінімізацію маси й габаритів основних елементів технологічного обладнання, що входить у комплект енергоустановок. Це відкриває перспективи створення високоефективних енергоустановок з турбоперетворювачами, які мають ряд значних переваг в порівнянні з традиційними газо- або паротурбінними установками.

З огляду на рівень температур (350 – 500К), при яких відбувається процес десорбції в ТСК, з’являється можливість використання в таких схемах теплових вторинних енергоресурсів високотемпературних теплотехнологічних комплексів ряду виробництв, де значна кількість теплоти втрачається з димовими газами, що йдуть. Використання теплоти ВЕР призведе до значного зниження споживання

енергії ТСК та збільшення коефіцієнту використання палива.

Промислові комплекси й установки, в яких реалізуються високотемпературні теплотехнологічні процеси, формують технічну базу основних енергоємних виробництв, таких як чорна і кольорова металургія, виробництво скла та кераміки, цементу. Відзначимо, що наявність подібних робочих процесів, реалізованих у високотемпературних агрегатах різного цільового призначення, таких як горіння палива, складний тепло - і масообмін у робочій зоні технологічного реактора, наявність системи регенерації теплоти, дозволяє застосувати загальний підхід для оцінки їхньої роботи з метою вибору перспективних напрямків підвищення ефективності паливовикористання та рішення завдань енергозбереження[13].

3 РОЗРОБКА СХЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ ВОДНЮ

3.1. Інтеграція водневої силової установки в теплотехнологічну схему скловарного виробництва

Розглянемо схему і цикл роботи утилізаційної установки, що використовує в якості робочого тіла водень (Рис.3.1).

Низькопотенційне тепло димових газів теплотехнічного комплексу в теплообмінному апараті I передається стислому водню та термосорбціоному компресору II. Процес нагріву водню відбувається в теплообміннику I до температурного рівня T_1, а в турбогенераторі III здійснюється розширення його до тиску P_2. Після цього водень низького тиску подається на іншу сторону компресора, де здійснюється процес сорбції водню металогідридом. Даний процес супроводжується виділенням теплоти, яку необхідно відводити. А процес стиснення водню до тиску P_1 здійснюється в термосорбціоному компресорі.

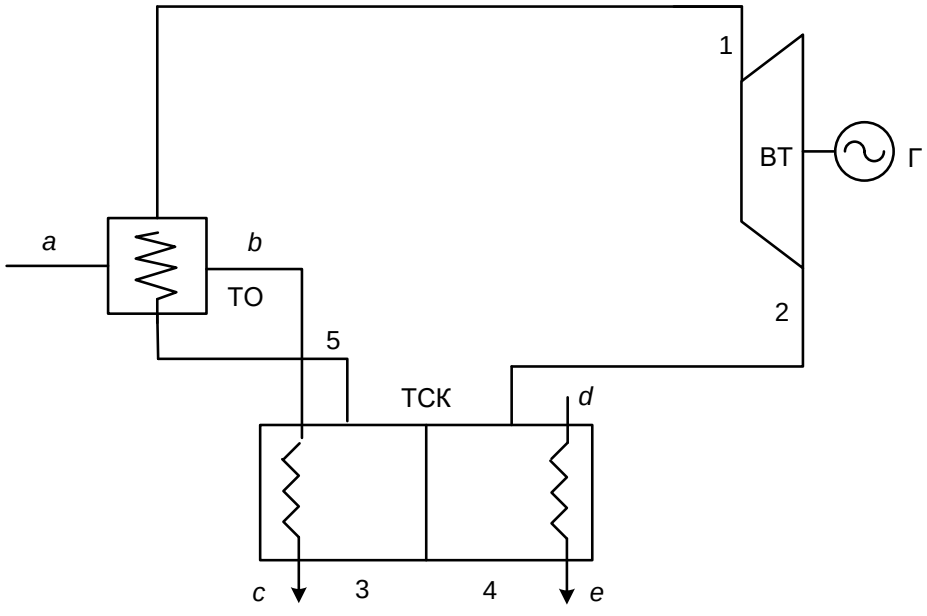


Рис.3.1. Утилізаційна установка, яка використовує в якості робочого тіла водень

Для підвищення ефективності можливо використовувати схему з

допоміжним нагріванням робочого толу при розширенні в турбіні, а також регенерацію тепла (Рис.3.2.). Схема з регенерацією теплоти передбачає наявність двух теплообмінних апаратів. В теплообміннику IV частково розширяється водень з параметрами P_2 і T_2 , він нагрівається до T_1, а потім в циліндрі низького тиску турбіни розширюється.

В теплообміннику-регенераторі V водень після турбіни нагріває потік водню, який після сорбційного компресора направляється в турбіну. Регенерація тепла можлива при високих значеннях температури T_1.

Для стиснення водню в таких схемах можливо використовувати й традиційні механічні компресори. Але в такому випадку для перетворення тепла в потенційну енергію стисненого газу повинно пройти ще додаткове перетворення тепла в механічну роботу, яка супроводжується значною втратою працездатності.

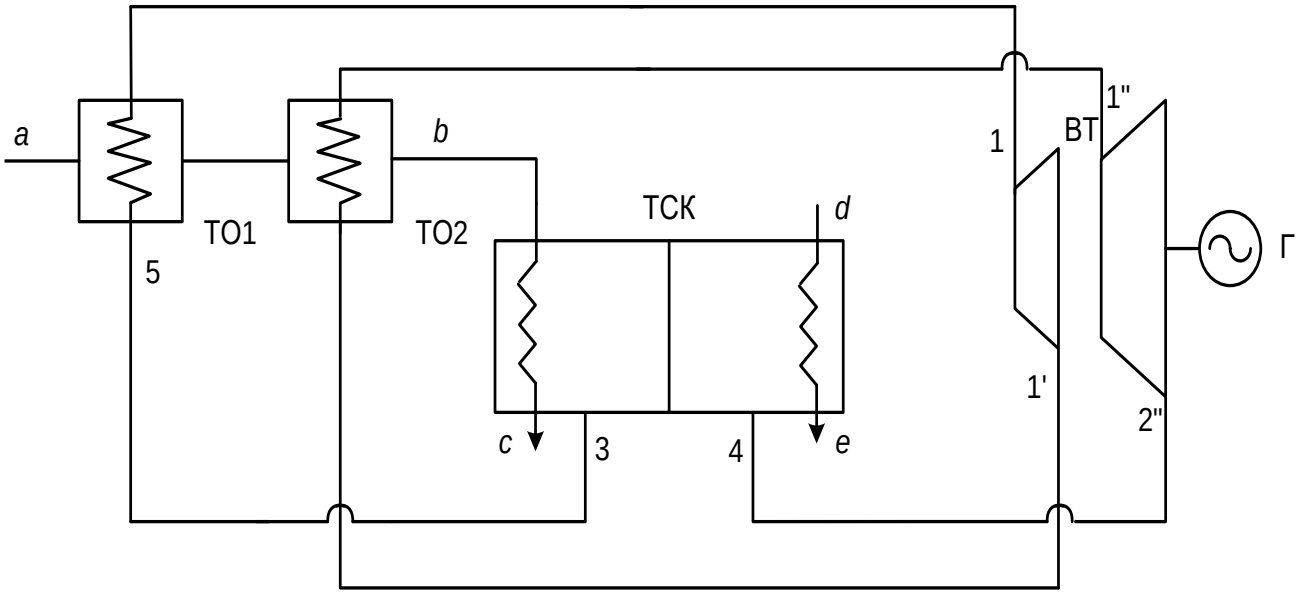


Рис.3.2. Схема утилізаційної газотурбінної установки з термосорбціонним компресором

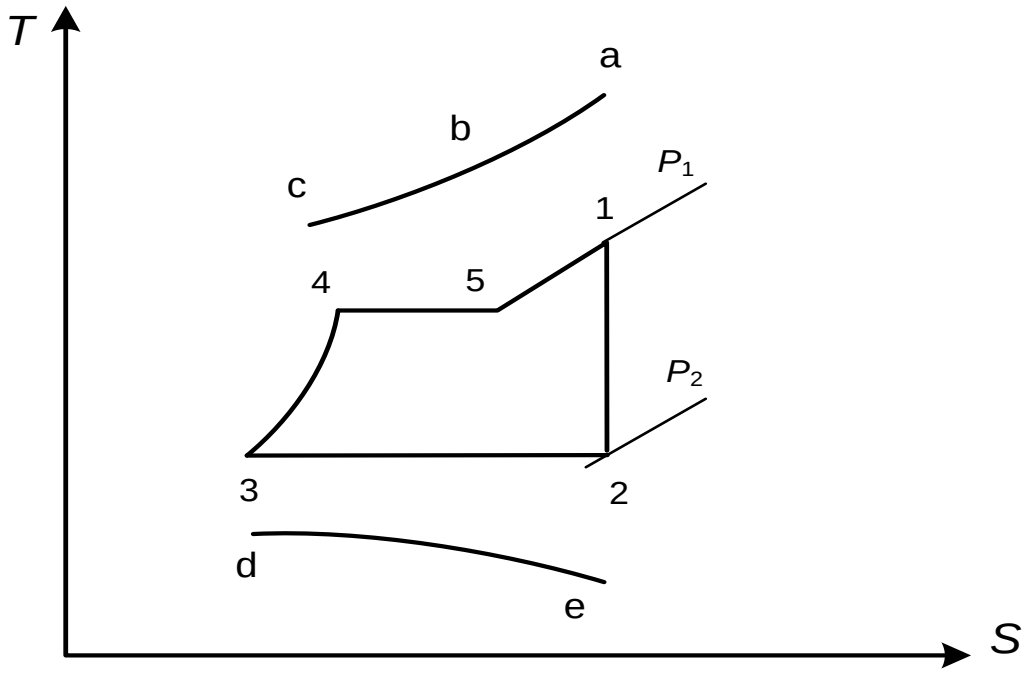
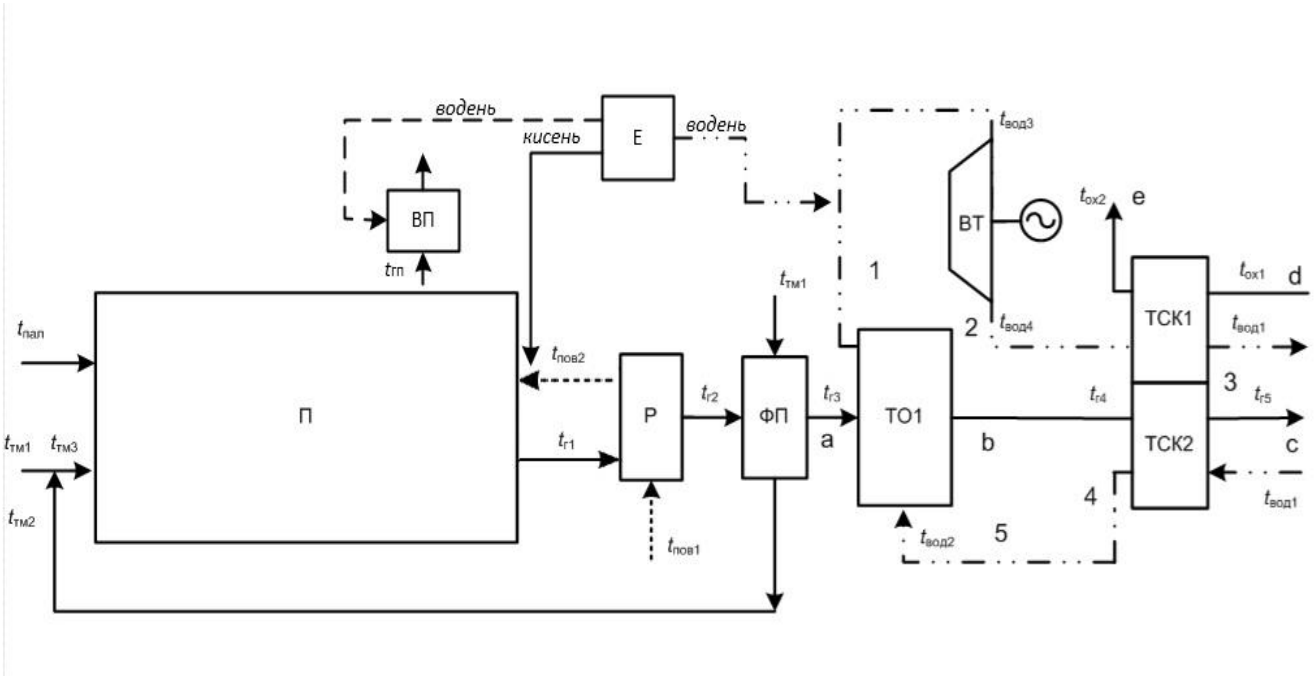


Рис.3.3. Цикл роботи утилізаційної газотурбінної установки з ТСК

Витрата енергії на стиснення в термосорбційному компресорі практично не залежить від ступеня підвищення тиску. У механічному компресорі навпаки, з ростом відношення тисків відбувається значне зростання долі енергії, що витрачається на стиснення робочого тіла. В діапазоні $p_2/p_1 < 100$ має місце перевищення витрат енергії в термосорбційному компресорі, в другому випадку $20 < p_2/p_1 < 100$ – в механічному компресорі. Але при цьому слід мати на увазі, що ТСК використовує низькопотенційне тепло з висом ступенем термодинамічної досконалості.

На Рис.3.4. представлено схему інтеграції водневої силової установки в теплотехнічному комплексі скловарного виробництва.



П – скловарна піч; Р – рекуперативний теплообмінник для підігріву повітря горіння; ФП – фільтр-підігрівник склобою; ТО1 – теплообмінник для підігріву водню; ВТ – воднева турбіна; ТСК – термосорбційний компресор; ВП – випальна піч; Е - електролізер

Рис.3.4. Інтеграція водневої тепло утилізаційної установки в схему скловарного виробництва

Основним елементом у схемі є рекуперативна скловарна піч П з центральним рекуператором Р. В піч подається шихта та паливо з температурами $t_{\text{тм1}}$ та $t_{\text{пал}}$ відповідно. Склобій з температурою $t_{\text{тм1}}$ подається в ектрофільтр-підігрівник ФП, в якому за рахунок теплоти димових газів він підігрівається до $t_{\text{тм2}}$. Одночасно тут здійснюється очищення газів від пилу, який осідає в шарі склобою. Далі підігрітий склобій змішується з іншими технологічними матеріалами шихти з температурою $t_{\text{тм3}}$ та подається в скловарну піч. Підігріте в рекуператорі Р повітря горіння подається у пальників пристрій печі з температурою $t_{\text{пов2}}$. Вихідними потоками є скломаса з температурою $t_{\text{гп}}$ та димові гази, які мають температуру $t_{\text{г1}}$. Вони потрапляють у рекуперативний теплообмінник Р і далі по газоходу у фільтр-підігрівник ФП. Передавши частину

тепла склобою, гази направляються в теплообмінник ТО1, де стиснений водень після ТСК2 нагрівається від температури $t_{\text{вод2}}$ до температури $t_{\text{вод3}}$. Кінцевим ступенем утилізації є ТСК2,в якому димові гази охолоджуються від температури $t_{\text{г4}}$ до температури $t_{\text{г5}}$ та далі подаються в димосос. Тут тиск водню збільшується до рівня P_2, а температура – до $t_{\text{вод2}}$. Процес стиснення водню здійснюється в ТСК, а процес розширення відбувається в турбіні ВТ, де тиск водню зменшується до P_1. Водень низького тиску подається в ТСК1, де здійснюється процес сорбції. Процес супроводжується виділенням певної кількості теплоти, яка відводиться системою охолодження [14].

3.2. Основні елементи утилізаційної схеми

3.2.1. Металогідридні компресори та їх застосування

Водень має здатність утворювати з'єднання з металами. Багато сплавів активно та великій кількості можуть поглинати та віддавати водень при зміні зовнішніх умов. Молекулярний водень в нормальних умовах активно взаємодіє лише з деякими металами, які володіють малим потенціалом іонізації: лужними, лужноземельними, рідкоземельними.

Водень з гідридів металів (Ме) можливо отримати двома способами – гідролізом та піролізом:

$$MeH_n + nH_2O \rightarrow Me(\text{OH})_n + nH_2, \tag{3.1}$$

$$MeH_n \rightarrow Me + \frac{n}{2}H_2. \tag{3.2}$$

Методом гідролізу можливо отримати в двічі більше водню, ніж його вміст в гідриді. Однак цей процес практично незворотній. Термічна дисоціація (сорбція-десорбція) гідриду дає можливість створювати акумулятори водню, для який незначна зміна температури чи тиску впливає на рівновагу реакції утворення

гідриду. За допомогою піролізу є можливість отримати чистий водень без побічних реагентів. Оборотність процесу піролізу

$$MeH_n \underset{p_2 \quad T_2}{\overset{p_1 \quad T_1}{\rightleftarrows}} Me + n/2H_2, \tag{3.3}$$

де $p_1 \leq p_2$, $T_1 \geq T_2$.

Це дозволяє направляти процес в необхідну сторону та з необхідною швидкістю практично нескінченну кількість разів.

Зв'язок водню з металом протікає з виділенням тепла. Екзотермічний процес утворення гідриду з водню і металу (зарядка) та ендотермічний процес вивільнення водню з гідриду (розрядка) можливо представити в наступному вигляді:

$$H_2 + Me \xrightarrow{зарядка} гідрид + тепло(вивільнене), \tag{3.4}$$

$$H_2 + Me \xrightarrow{розрядка} гідрид + тепло. \tag{3.5}$$

Умова вивільнення водню з гідриду:

$$Q_{т.о} \geq \Delta H , \tag{3.6}$$

$Q_{т.о}$ – теплота газів, які відходять, використовуються для вивільнення водню;

ΔН – теплота утворення гідриду.

У випадках оборотного поглинання водню ізотерми сорбції мають три характерні ділянки (Рис.4.1.). Початковий крутий підйом відповідає утворенню твердого розчину водню або α-фазі, в цій області розчинення атомів водню в металі відбувається без істотних змін кристалічної решітки і залежність тиску від складу описується законом Сівертса

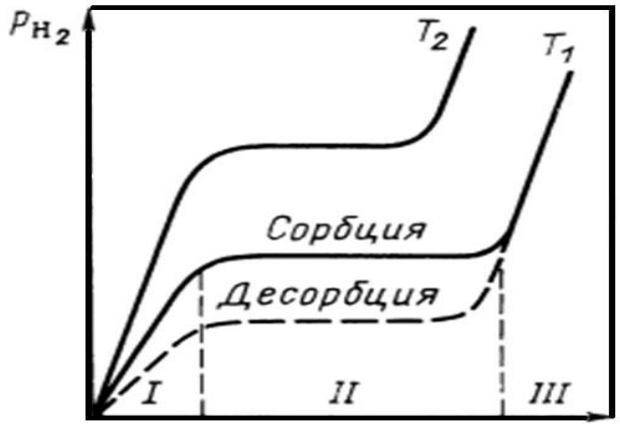
$$\sqrt{P_{H_2}} = K_H x, \tag{3.7}$$

K_H – константа Сівертса;

x – концентрація водню в твердій фазі (Н/моль Ме);

P_{H_2} - тиск водню над гідридом.

P_{H_2}



I – область α-фази; II – α-β переход; III – область β-фази

Рис.4.1. Діограма тиску, температура системи ІМЗ – водень при різних температурах ($T_2 > T_1$)

Після насичення воднем α-фази починається процес утворення гідриду металу β-фази, яка супроводжується різким зміненням параметрів (в деяких випадках і типу) кристалічної решітки. Після появи другої фази тиск водню не змінюється при подальшому додоюванню водню спостерігається плато – область α-β перехід [15-16].

Гідриди лужних та лужноземельних металів потребують для свого синтезу високих температур та тиску, при якому реакція гідрування чутлива до малих домішок в металі та водню. Більш вигідно використовувати в якості акумуляторів водню гідриди інтерметалічніх з'єднаннь (ІМЗ) та сплавів. Інтерметаліди – це з'єднання металів, що являють собою гомогенні фази, за своєю структурою відрізняється від початкового металу, мають характер хімічного з'єднання з постійним складом в широкому діапазоні температур. Водень гарно взаємодіє з такими сполуками, одним з компонентів яких є метал, який утворює стійкий бінарний гідрид.

Можливість зміщення рівноваги реакції інтерметаліда з воднем при невеликому зміненні температури та тиску робить гідриди інтерметалічних з'єднаннь більш зручним матеріалом для створення зворотно діючих акумуляторів водню. Особливість їх взаємодії з воднем заключається в том, що при досить низьких температурах (298 – 373 ºС) та тиску (0,01 до 10 МПа) поглинання водню ІМЗ, в залежності від його природи та чистоти поверхні, досягає рівноваги за декілька хвилин. Також перевагою ІМЗ є те, що для їх розкладу необхідні низькі температури, а при регенерації низький тиск.

Інтерметаліди здатні адсорбувати водень в значній кількості при температурі, яка близька до температури середовища. Наприклад $LaNiH_6$ утворюється при кімнатній температурі та тиску 0,25 МПа, густина атомів водню в цьому гідриді складає $6{,}2 \cdot 10^{22}$ атомів Н на $см^3$, а це в півтора рази більше ніж в рідкому водні.

Зручно, що водень можливо додавати та видаляти до металічних сплавів при температурах, які знаходяться в межах десятків градусів по відношенню до температури зовнішнього середовища. Для забезпечення функціонування гідридної системи зберігання водню можливо використовувати тепло низько температурного потенціалу, наприклад потік тепла, що відходить. Кількість енергії, необхідної для роботи металогідридної системи зберігання, мала в порівнянні з кількістю енергії, яка необхідна для скраплення чи зберігання газу при високому тиску.

Здатність гідридів інтерметалічних з'єднань при тепловій взаємодії сорбувати водень при низькому тиску та десорбувати його при високому тиску дозволяє використовувати ці з'єднання в теросорбційних компресорах для компресії водню. Дія таких компресорів основана на використанні ендотермічних та екзотермічних процесів сорбції та десорбції водню гідридами.В якості сорбентів використовують такі інтерметаліди: $LaNi_5$ та FeTi, які утворюють гідриди виду:$LaNi_5H_6$ і $FeTiH_x$.

В гідридних машинах одна і теж кількість водню, який багаторазово абсорбується і десорбується, не витрачається в якості горючого. Газ нагрівають, а

потім він розширюється в турбіні, на кінці якої водень конденсується шляхом абсорбції в гідридоутворюючому металі. На наступному етапі гідрид знову нагрівають, щоб отримати газ під високим тиском. Такий цикл було запропоновано для використання тепла високотемпературного атомного реактора. Гідридний резервуар, наприклад з $FeTiH_{x,}$, в цій схемі заміняє газовий компресор,тобто компресор без рухомої частини. Існують металогідридні компресори продуктивністю на рівні 60м^3/год. при тиску в 5,0 МПа, які не мають рухомих частин, працюють безшумно, не забруднюють водень.

Металогідридні ТСК використовують в енергетичних установках, в комбінованих газотурбінних циклах, для систем компримування та скраплення водню, для розподілу воднево-ізотопних сумішей [17-18].

3.2.2. Воднева турбоустановка

Використання в якості робочого тіла газів з малою молекулярною масою дає можливість створення ефективних енергоустановок з турбоутворювачами, які мають ряд переваг в порівнянні з традиційними ГТУ. Легкі гази мають теплофізичні властивості, які можуть забезпечувати мінімізацію маси та габаритів основного обладнання, яке входить до комплекту енергоустановок.

Використання водню як робочого тіла накладає ряд додаткових вимог, пов’язаних з його високою плинністю, вибухо- та пожежонебезпечністю, а також з проблемою вибору металів, що не піддаються водневій корозії. Водень має високу теплоємність, що за інших рівних умовах призводить до значного збільшення кількості ступенів в проточній частині турбіни.

Високий ступінь стиснення водню, і як наслідок малі питомі обсяги робочого тіла, що рухається в турбіні, накладають певні умови на вибір типу проточної частини турбіни та на кількість ступенів.

Зіставлення розрахункових параметрів та інтегральних характеристик турбін, у якій в якості робочого тіла використовують водень, з аналогічними за

параметрами і характеристиками прототипу – гелієвих турбін, свідчить, що при збереженні конструктивних елементів та основних габаритів, теплоперепад водневої турбіни виявляється майже в два рази вище , ніж гелієвої. Це при однаковій потужності агрегатів призводить до скорочення масових витрат робочого тіла в 2 рази.

Для зменшення числа ступенів при використанні як робочого тіла легких газів, необхідно змінювати параметри ступенів для збільшення їх питомої роботи.

Збільшення осьових габаритів турбін призводить не тільки до зростанню витрат енергії потоку, але й до додаткових труднощів, обумовлених необхідністю забезпечення критичної жорсткості ротора, створення як кінцевих, так і міжступеневих ущільнень, використання спеціальних конструкцій підшипників. У той же час конструкції турбіни з меншою кількістю ступенів пов'язані з необхідністю застосування високонавантажених ступенів, що призводить до істотного зниження КПД із-за негативної реактивності ступеня.

Особливості використання водню в якості робочого тіла в турбіні є можливість збільшення частки загального перепаду на ступінь у порівнянні з традиційними газовими турбінами, тому що швидкість звуку в водні має більше значення ніж в повітрі. Це дозволяє шляхом збільшення швидкості руху робочого потоку забезпечити прийнятий рівень газодинамічних втрат в ступенях. Крім того, питома робота водню значно перевищую показники інших газів, що при рівних потужностях вимагає меншої масової витрати робочого тіла.

При використанні водню вихідна швидкість потоку з останнього ступеня виявляється досить високою, але її вплив несуттєвий, оскільки відносні витрати з вихідною швидкістю невеликі із-за великих тепло перепадів.

Сучасні технології та конструкції турбоустановок дозволяють вирішити багато проблем використання водню в якості робочого тіла в енергетичних комплексах невеликої потужності. На сьогодні маємо як експериментальний так і експлуатаційний досвід роботи турбін на гелії, який за своїми теплофізичними властивостями близький до водню.

До переваг даної установки в порівнянні з ПТУ можна віднести:

1) більш ефективне використання високих температур;
2) зменшену довжину лопаток останнього ступеня;
3) мала потреба в охолоджувальній воді;
4) більш високу ефективність компанування;
5) використання сухої градирні;
6) кращі теплофізичні характеристики.

Використання в якості робочого тіла водню дозволяє забезпечити турбоустановці такі ж переваги

Істотний вплив на характеристики ГТУ надають показник адіабати k та питома теплоємність c_p робочого тіла. Оптимальна ступінь підвищення тиску в циклі $\pi_{k_{\text{опт}}}$ з ростом значення показника адіабати знижується.

Термохімічна технологія компримування робочого тіла дозволяє використовувати низькопотенційне тепло для отримання досить високого ступеня стиснення водню, що вимагає особливого підходу до створення розширювальної машини роторного типу.

Схеми ГТУ з ТСК мають наступні особливості:

- немає необхідності використовувати компресор класичного типу з відбором потужності від турбіни;
- відсутня необхідність в створенні підігрівача робочого тіла, оскільки в самому ТСК використовується низькопотенційне тепло зовнішнього джерел;
- немає необхідності в створенні пристрою для охолодження робочого тіла в циклі, тому що розширення робочого тіла в турбіні з початковим високим тиском, створюваному ТСК, може бути проведено при достатньо низьких температурах;
- при спрацьовуванні перепаду тиску в турбіні отримана механічна енергія може бути використана різними способами, включаючи перетворення її електричну.

4 РОЗРАХУНКОВО-ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВОДНЕВИХ ЕНЕРГОПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

4.1. Визначення об’ємів та теплового потенціалу димових газів скловарної печі

Нижча теплота згоряння газоподібного палива, кДж/м^3:

$$Q_{\text{н}}^{\text{c}} = 126CO + 358\text{CH}_4 + 638C_2H_6 + 913C_3\text{H}_8 + 1187\text{C}_4\text{H}_{10} + 1460\text{C}_5\text{H}_{12} + 108H_2$$

$$Q_{\text{н}}^{\text{c}} = 358\cdot92{,}8+638\cdot2{,}8+913\cdot0{,}9+1187\cdot0{,}4+1460\cdot0{,}1=36\ 451{,}3 \text{ кДж/м}^3. \quad (4.1)$$

Теоретичні об’єми повітря й продуктів згорання при спалюванні 1 нм^3 газоподібного палива розраховуються за наступними формулами, м^3/м^3:

- теоретичний об'єм повітря

$$V^0 = 0{,}0476\left[\sum(m+n/4)\text{C}_m\text{H}_n + 0{,}5(\text{CO}+\text{H}_2) + 1{,}5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2\right] \quad (4.2)$$

$$V^0 = 0{,}0476\cdot[2\cdot92{,}8+3{,}5\cdot2{,}8+5\cdot0{,}9+6{,}5\cdot0{,}4+8\cdot0{,}1]=9{,}677 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

- теоретичні об'єми продуктів згоряння триатомних газів, азоту й водяної пари

$$V_{RO_2} = 0{,}01(\sum m\text{C}_m\text{H}_n + \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S}) \quad (4.3)$$

$$V_{RO_2} = 0{,}01\cdot(92{,}8+2\cdot2{,}8+3\cdot0{,}9+4\cdot0{,}4+5\cdot0{,}1+0{,}5)=1{,}037 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V_{N_2}^0 = 0{,}79V^0 + 0{,}01\text{N}_2 \quad (4.4)$$

$$V_{N_2}^0 = 0{,}79\cdot9{,}677+0{,}01\cdot2{,}5=7{,}669 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V_{H_2O}^0 = 0{,}01\cdot(\sum\frac{n}{2}\text{C}_m\text{H}_n + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2 + 0{,}124d_{\text{г}} + 1{,}61\cdot V^0), \quad (4.5)$$

$$V_{H_2O}^0 = 0{,}01\cdot(2\cdot92{,}8+3\cdot2{,}8+4\cdot0{,}9+5\cdot0{,}4+6\cdot0{,}1+1{,}61\cdot9{,}677)=2{,}157 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

де $d_{\text{г}}$ – вологовміст газоподібного палива (враховується за умови $d_{\text{г}}$ >10 г/кг

сухого газу). У розрахунках прийняти $d_г < 10$ г/кг сух. газу.

Дійсна кількість повітря горіння, м^3/м^3:

$$V_{пов} = \alpha_{вих} V^0;\ V_{пов}=1{,}1 \cdot 9{,}677=10{,}644 \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (4.6)$$

де $\alpha_{вих}$ – коефіцієнт надлишку повітря на виході з котельного агрегату.

Дійсні кількості продуктів згоряння при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha_{вих}$, м^3/м^3:

$$V_{H_2O} = V^0_{H_2O} + 0{,}0161 \cdot (\alpha_{вих} - 1)V^0, \quad V_{N_2} = V^0_{N_2} + (\alpha_{вих} - 1)V^0, \quad (4.7)$$

$$V_{H_2O}=2{,}157+0{,}0161 \cdot (1{,}1\text{-}1) \cdot 9{,}677=2{,}172 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V_{N_2}=7{,}669+0{,}1 \cdot 9{,}677=6{,}701 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Об’єм триатомних газів V_{RO_2} не залежить від значення коефіцієнта надлишку повітря $\alpha_{вих}$.

Тоді дійсний об’єм димових газів на вході в КТАН можна визначити за формулою

$$V_Г = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O}, \quad (4.8)$$

$$V_Г=1{,}037+2{,}172+6{,}701=9{,}91 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Склад продуктів горіння (у долях):

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_Г}, \qquad r_{HO_2} = \frac{V_{HO_2}}{V_Г}, \qquad r_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_Г} \quad (4.9)$$

де $r_{RO_2}=1{,}037/9{,}91=0{,}104$; $r_{HO_2}=2{,}172/9{,}91=0{,}219$; $r_{N_2}=6{,}701/9{,}91=0{,}676$.

Об’ємна теплоємність димових газів:

$$C_Г = C_{CO_2} \cdot r_{CO_2} + C_{N_2} \cdot r_{N_2} + C_{H_2O} \cdot r_{H_2O}, \quad (4.10)$$

$C_Г=1{,}8248 \cdot 0{,}104+1{,}3031 \cdot 0{,}219+1{,}5323 \cdot 0{,}676=1{,}5109$ кДж/(м^3·К),

$C_Г=1{,}8475 \cdot 0{,}104+1{,}3052 \cdot 0{,}219+1{,}5383 \cdot 0{,}676=1{,}5178$ кДж/(м^3·К),

$C_Г=1{,}8960 \cdot 0{,}104+1{,}3114 \cdot 0{,}219+1{,}5538 \cdot 0{,}676=1{,}5347$ кДж/(м^3·К),

$C_Г=1{,}9161 \cdot 0{,}104+1{,}3143 \cdot 0{,}219+1{,}5607 \cdot 0{,}676=1{,}5421$ кДж/(м^3·К),

$C_Г$=1,9591·0,104+1,3219·0,219+1,5774·0,676=1,5596 кДж/(м^3·К).

Результати розрахунку наведено в Таблиці 4.1

Таблиця 4.1

Значення теплоємностей димових газів після скловарної печі

Температура, К	Теплоємність, кДж/(м^3·К)
523	1,5109
553	1,5178
623	1,5347
653	1,5421
723	1,5596

Загальна кількість димових газів складає, м^3/с

$$V_{г\Sigma} = B_п \cdot V_г , \quad (4.11)$$

$$V_{г\Sigma} = 750 \cdot 9,91 = 7432,5 \text{ м}^3/\text{год} .$$

4.2. Визначення основних показників роботи водневої теплоутилізаційної системи

Робота стиснення для реальних циклів, що протікають в ТСК, визначається за формулою

$$l = q_s \eta_t \eta_{тск}, \quad (4.12)$$

де η_t – ККД циклу Карно в інтервалі робочих температур ТСК;

$\eta_{тск}$ – відносний ефективний ККД компресора (0,7 – 0,9).

Проаналізуємо роботу водневої енергоустановки в діапазоні температур димових газів T_a від 523 до 673 К з кроком 50 К. Температура димових газів на виході після компресора складає T_c = 393 К.

Кількість теплоти, що відбирається від димових газів, та передається силовому контуру утилізаційного комплексу

$$Q_г = G_г C_г (T_a - T_c), \quad (4.13)$$

$$Q_г=2,748\cdot1,215\cdot(523-393)=434,046 \text{ кВт},$$

$$Q_г=2,748\cdot1,222\cdot(573-393)=604,45 \text{ кВт},$$

$$Q_г=2,748\cdot1,229\cdot(623-393)=776,777 \text{ кВт},$$

$$Q_г=2,748\cdot1,237\cdot(673-393)=951,797 \text{ кВт}.$$

де $G_г = V_{г\Sigma}\cdot\rho_г / 3600$ – масова витрата димових газів ($G_г$ = 2,748 кг/с);

$\rho_г$ – густина димових газів $\rho_г = \rho_{RO_2} r_{RO_2} + \rho_{N_2} r_{N_2} + \rho_{H_2O} r_{H_2O}$ (ρ_{RO_2}=1,96; ρ_{N_2}=1,25; ρ_{H2O}=1,29 кг/м^3– густина триатомних газів, азоту й повітря, кг/м^3).

$\rho_г$=1,96·0,104+0,219·1,29+0,676·1,25=1,331 кг/м^3.

$C_г$ – масова теплоємність димових газів, кДж/(кг·К).

Розрахуємо основні показники роботи утилізаційної системи з водневою турбоустановкою та термосорбційним компресором з гідридом $LaNi_5H_{6,7}$. Теплота фазового переходу гідриду складає q_s = 15500 кДж/кг. Тиск водню на виході з компресора - P_5 = 2 МПа. Температура робочого тіла в точках 4 і 5 $T_4 = T_5$, а тиск $P_4 = P_5$. При максимальній температурі газів T_a перепад температур між димовими газами і воднем складає $\Delta T_1 = T_a - T_1$ = 100 К, температура водню в точці 1 – $T_1 = T_a - \Delta T_1$. Величина перепадутемператур $\Delta T_2 = T_c - T_4$ складає 20 К. Температура T_2 дорівнює температурі сорбції при відповідному тиску водню.

Визначимо кількість робочого тіла в водневому контурі за наступною формулою

$$G_{H_2} = \frac{Q_г}{q_s + C_{pH_2}(T_1 - T_5)}, \quad (4.14)$$

$$G_{H_2} = \frac{434,046}{15500 + 14,387(423 - 273)} = 0,025 \text{ кг/с},$$

$$G_{H_2} = \frac{604,45}{15500 + 14,420(473 - 273)} = 0,033\,\text{кг/с},$$

$$G_{H_2} = \frac{776,777}{15500 + 14,433(523 - 273)} = 0,041\,\text{кг/с},$$

$$G_{H_2} = \frac{951,797}{15500 + 14,445(573 - 273)} = 0,048\,\text{кг/с},$$

де C_{pH_2} – масова теплоємність водню, кДж/(кг·К).

Потужність водневої турбіни знаходиться за формулою

$$N_T = G_{H_2} C_{pH_2} T_1 \left(1 - \frac{1}{\left(P_5 / P_3 \right)^{\frac{к-1}{к}}} \right) \eta_m, \qquad (4.15)$$

$$N_T = 0.025 \cdot 14,387 \cdot 423 \cdot (1 - \frac{1}{(\frac{2}{0,78})^{\frac{1-1,41}{1,41}}}) \cdot 0,8 = 29,15\ \text{кВт},$$

$$N_T = 0,033 \cdot 14,420 \cdot 473 \cdot (1 - \frac{1}{(\frac{2}{0,48})^{\frac{1.41-1}{1.41}}}) \cdot 0,8 = 61,16\ \text{кВт},$$

$$N_T = 0,041 \cdot 14,433 \cdot 523 \cdot (1 - \frac{1}{(\frac{2}{0,29})^{\frac{1,41-1}{1,41}}}) \cdot 0,8 = 106,4\ \text{кВт},$$

$$N_T = 0,048 \cdot 14,445 \cdot 573 \cdot (1 - \frac{1}{(\frac{2}{0,2})^{\frac{1,41-1}{1,41}}}) \cdot 0,8 = 155,12\ \text{кВт},$$

де k=1,41 – показник адіабати для водню;

P_5 / P_3 – ступінь підвищення тиску в термосорбційному компресорі;

$\eta_т$ =0,8 – ККД турбіни.

В Таблиці 4.2 наведено отримані результати розрахункового дослідження з використанням формул (4.13) – (4.15) при зміні рівня температур димових газів на вході в ТСК за умов їх постійної витрати.

Таблиця 4.2

Характеристики основних параметрів енергосилової установки в схемі скловарного виробництва

Температура димових газів на вході в компресор T_a, К	523	573	623	673
Температура T_5, К	273	273	273	273
Кількість теплоти, що передається водневому контуру $Q_г$, кВт	434,046	604,45	776,777	951,797
Тиск водню P_3, МПа	0,78	0,48	0,29	0,2
Температура димових газів на вході в компресор T_2, К	323	311	297	293
Витрата робочого тіла в водневому контурі G_{H_2}, кг/с	0,025	0,033	0,041	0,048
Потужність водневої турбіни $N_т$, кВт	29,15	61,16	106,4	155,12

4.3 Вибір параметрів та режимів роботи термосорбційного компресора

Подальші розрахунки проводилися для останнього варіанту схеми при T_a = 723 К. Це пов’язано з тим, що потужність водневої турбіни в інших варіантах є меншою, що негативно відображається на ефективності застосування когенераційного обладнання.

Таким чином, витрата робочого тіла в водневому контурі складає для даного варіанту G_{H_2} = 0,048кг/с. Отже, нам необхідно отримати саме таке значення середньої швидкості виділення водню в ТСК. Для цього ми

використовуємо генератори-сорбери з гідридом $LaNi_5$, так як його властивості є досить добре досліджені на даний момент. Він має стабільні характеристики та забезпечує тривалий час роботи без погіршення своїх властивостей.

На Рис.4.1. наведено конструкцію генератора-сорбера (ГС). Вільний простір для інтерметаліду утворено трубкою 1, донцями 2 і 6 та трубкою 3, у яку подається гріючий теплоносій (димові гази). Підведення і відбір водню здійснюється за допомогою двох колекторів 7. Колектор являє собою сталеву трубку, що перфорована отворами. Перфорація виконана у вигляді чотирьох рівновіддалених друг від друга рядів свердлінь, розташованих по довжині трубки. Для запобігання віднесення часток інтерметаліду в газову лінію установки перфорована ділянка колектора покрита фільтром з листової пористої нержавіючої сталі з тонкістю фільтрації не більше 2 мкм.

Для підведення і відбору водню ГС має штуцер 8, що з'єднується з колекторами через порожнину, утворену донцями 6 і 14. На трубі 1 розташована сорочка охолодження 9. Підбор і відведення охолоджуючої води здійснюється через патрубки 10 і 11. Генератор-сорбер містить пакет внутрішнього поперечного оребрення з мідних пластин 12 товщиною 0,1 мм, встановлених з натягом по поверхні труб 1 і 3.

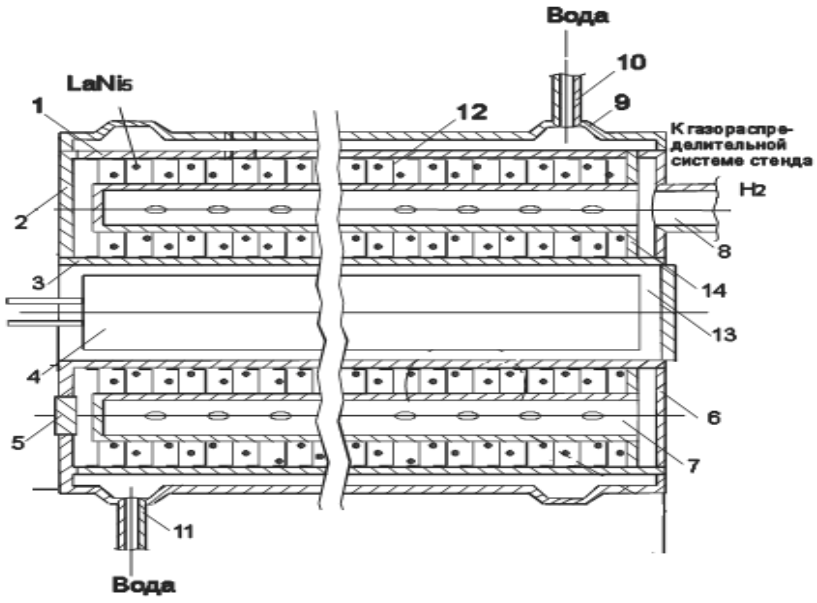


Рис. 4.1. – Схема генератора-сорбера

Відстань між пластинами оребрення становить 2 мм. Для зменшення термічного опору простір між трубою 3 і електронагрівником заповнено мідним порошком 13. Інтерметалід засипається через отвір, що герметично заварюється пробкою 5.

Тиск та температура десорбції відповідно: $P_д$ = 2 МПа, $T_д$ = 723 К, а температура сорбції $T_с$ = 293 К.

Для подальших розрахунків були використані дані Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України по установці ТСК 70, в якій використовується також гідрид $LaNi_5$.

Але, якщо взяти до уваги циклічність роботи ГС, стає зрозуміло, що він не зможе підтримувати необхідний потік водню весь час, так як деякий час йому необхідно сорбувати водень. Тому необхідно використовувати одразу чотири ГС при роботі по несиметричному циклу (Рис 4.2.).

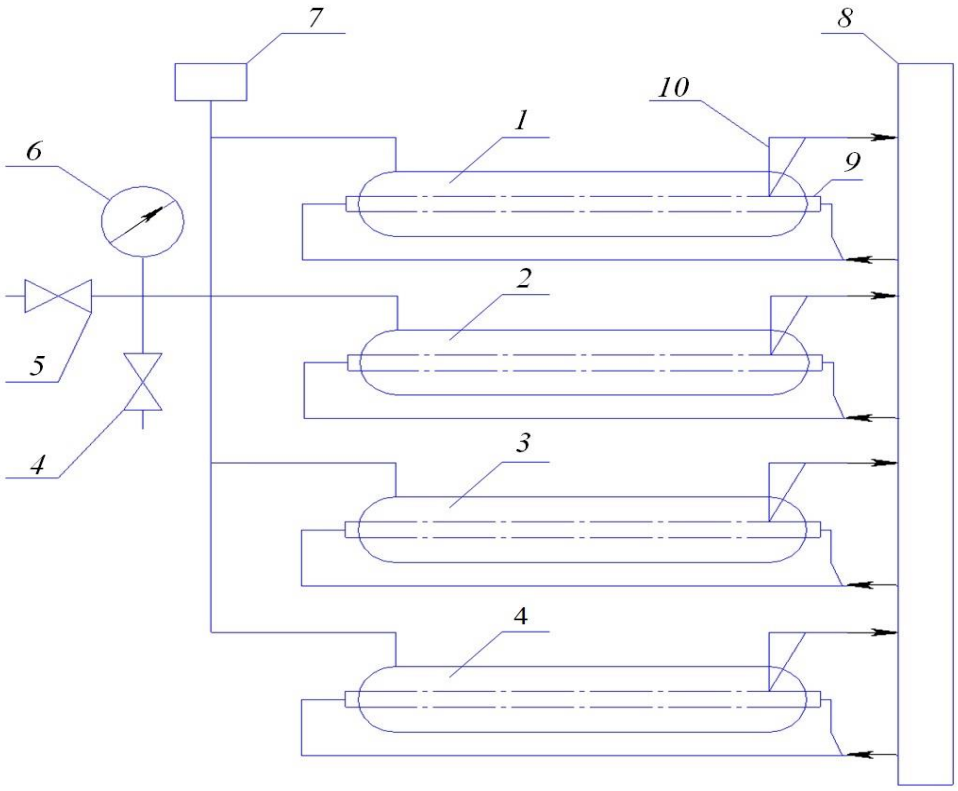


Рис.4.2. Схема ТСК з чотирма ГС

Маса та об’єм гідриду в одному ГС розраховуються як:

$$M_{ГІД} = \frac{\tau \cdot G_{H_2}}{C_{H_2 ГІД}} = \frac{980 \cdot 48}{0,015 \cdot 1000} = 3136 \text{ кг.} \quad (4.16)$$

де $C_{H_2 ГІД} = 0,015$ – доля водню в гідриді;

$$V_{ГІД} = \frac{M_{ГІД}^{\min}}{\rho_{ГІД}} = \frac{3136}{3300} = 0,95 \text{ м}^3, \quad (4.17)$$

де $\rho_{ГІД} = 3300$ кг/м^3 – густина гідриду.

Знаючи загальну масу гідриду, можливо розрахувати довжину генераторів-сорберів за формулою:

$$L_г = \frac{4 \cdot M_Г}{\pi \cdot (d_1^2 - d_2^2) \cdot \rho_Г} = \frac{4 \cdot 3136}{3,14 \cdot (0,048^2 - 0,032^2) \cdot 3300} = 995 \text{ м.} \quad (4.18)$$

де $\rho_Г = 3300$ кг/м^3 – густина гідриду;

$d_1 = 0,048$ м, $d_2 = 0,032$ м – зовнішній та внутрішній діаметри корпусу ГС.

Приймемо довжину одного генератора $l_г = 1,52$ м. Тоді загальна кількість генераторів-сорберів, необхідна для безперервної роботи ТСК, складе

$$n = \frac{L_г}{l_г} = 656 \text{ шт.} \quad (4.19)$$

Враховуючи те, що генератори поєднані в блоки по 4 шт., знайдемо загальну кількість блоків ГС

$$n_{бл} = \frac{n}{4} = 164 \text{ блоки.} \quad (4.20)$$

Таким чином, проведені розрахунки дозволили визначити основні характеристики та режим роботи генераторів-сорберів, що забезпечать задану кількість водню в системі.

4.4. Визначення ефективності роботи водневої теплоутилізаційної системи

Електрична енергія, що отримується в водневій енергоустановці, може бути використана в електролізері для отримання водню, який застосовується при флоат-процесі виробництва листового скла в якості складової захисної атмосфери. Середня питома витрата енергії на виробництво 1 м^3 водню в сучасних електролізерах складає $n_{ел}$ = 4,3 кВт·год. Тоді при потужності водневої турбоустановки $N_т$ = 155,12 кВт кількість водню, що виробляється, складе

$$V_{вод} = N_т / n_{ел} = 155,12/4,3 = 36,1 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (4.21)$$

Кількість кисню:

$$V_{O2} = V_{вод} / 2 = 36,1/2 = 18,05 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (4.22)$$

В процесі електролізу на 1 м^3 водню виділяється також 0,5 м^3 кисню, який може бути застосований в якості окислювача для природного газу в скловарній печі. Подача чистого кисню дає можливість підвищити температуру горіння палива за рахунок зменшення подачі в зону горіння інертних газів (азоту), який входить до складу повітря горіння.

Таким чином, існує можливість зменшення витрати палива або збільшення видатності печі при незмінності його витрати. Якщо розглядати перший варіант, то виникає питання порушення технології плавки скломаси за рахунок зменшення кількості димових газів в просторі печі. Тому розглянемо можливість підвищення продуктивності печі по скломасі, залишаючи витрату паливо незмінною. Для цього потрібно провести розрахунки температури горіння природного газу для випадків подачі атмосферного повітря та повітря, збагаченого киснем.

Кількість чистого кисню на 1 м^3 природного газу складає:

$$v_{O2} = V_{O2} / (B_п) = 18,05/750 = 0,024 \text{ м}^3/\text{ м}^3. \quad (4.23)$$

Відсотковий склад кисню в збагаченому повітрі:

$$z = [(0,21 \cdot v_B^{'} + v_{O_2}) / (v_B^{'} + v_{O_2})] \cdot 100, \quad (4.24)$$

де $v_B^{'}$ - кількість незбагаченого повітря м^3/м^3 газу, для спалення газу в збагаченому киснем повітрі при коефіцієнті витрат кисню $\alpha_к$=1,0,

v_{O_2} - кількість чистого кисню, м^3/м^3 газу.

z = 21,5.

Для першого випадку теоретичний тепловий баланс топки (нехтуючи азотом палива):

$$\{v_{RO_2} \cdot c_{CO_2} + v^0 \cdot [\frac{21}{z} \cdot (1 - \frac{z}{100}) + \frac{21}{z}(\alpha^{'} - 1)] \cdot c_{R_2} + v_{H_2O} \cdot c_{H_2O}\} \cdot t_K = Q_H^P \qquad (4.25)$$

$$\{v_{RO_2} \cdot c_{CO_2} + v^0 \cdot [0,79 + (\alpha - 1)] \cdot c_{R_2} + v_{H_2O} \cdot c_{H_2O}\} \cdot t_K = Q_H^P + I \qquad (4.26)$$

де I – ентальпія гарячого повітря,

c_{R_2} - середня теплоємність двух атомних газів.

Для другого випадку – при згоранні на збагаченому повітрі:

$$\{v_{RO_2} \cdot c_{CO_2} + v^0 \cdot [\frac{21}{z} \cdot (1 - \frac{z}{100}) + \frac{21}{z}(\alpha^{'} - 1)] \cdot c_{R_2} + v_{H_2O} \cdot c_{H_2O}\} \cdot t_K = Q_H^P . \qquad (4.27)$$

Температура горіння за умов використання атмосферного повітря складає $t_{г1}$ = 2291 °С, при додаванні кисню $t_{г2}$ = 2315 °С. Тоді кількість тепла, що вноситься в робочий простір печі, складає:

для першого випадку

$$Q_1 = \left(V_г^Z C_г t_{г1} + I_{гв}\right) B_г = \left(9,91 \cdot 1,947 \cdot 2291 + 10,664 \cdot 1,82 \cdot 600\right) 750/3600 =$$

$$= 11635 кВт; \qquad (4.28)$$

для другого випадку

$$Q_2 = \left(V_г^Z C_г t_{г1} + I_{гв}\right) B_г = \left(9,91 \cdot 1,947 \cdot 2315 + 10,664 \cdot 1,82 \cdot 600\right) 750/3600 =$$

$$= 11751 кВт. \qquad (4.29)$$

Приріст видатності печі по скломасі складає:

$$\Delta G = G_п (Q_2 / Q_1) - G_п = 21120 \cdot 1,099 - 21120 = 209 т/рік \qquad (4.30)$$

або

$$(Q_2 / Q_1)\cdot 100 = 0{,}99\ \%, \tag{4.31}$$

де річна продуктивність скловарної печі $G_п$ = 21120 т/рік.

Економія електричної енергії складає

$$\Delta W = N_т\cdot\tau = 155{,}12\cdot 8040 = 1247164\ \text{кВт·год/рік}. \tag{4.32}$$

або

$$S_{ел} = 1247164\cdot 1{,}507 = 1879476\ \text{грн/рік}. \tag{4.33}$$

Таким чином, проведене розрахунково-теоретичне дослідження показало ефективність застосування водневого енергоперетворювального комплексу при інтеграції його в технологічну схему скловарног виробництва.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто характеристики фізико-хімічних процесів при виробництві скломаси, а також конструкцію та принцип дії основного теплотехнологічного обладнання скловарного виробництва.
2. Проведено аналіз енергоспоживання процесу виробництва листового скла. Визначено, що при цьому 72% витрат енергії приходиться на основний агрегат – скловарну піч, а основними втратами в процесі є втрати з димовими газами, що відходять.
3. Проаналізовано сучасний стан використання водню при виробництві скломаси. Для утилізації димових газів скловарних печей запропоновано використання енергоперетворювального комплексу з водневою турбоустановкою та термосорбційним металогідридним компресором.
4. Проведено розрахунково-теоретичне дослідження з метою визначення основних параметрів роботи водневої теплоутилізаційної системи в діапазоні температур димових газів від 523 до 723 К.
5. Для обраного варіанту схеми виконано розрахунок з метою визначення ефективності його застосування. За результатами розрахунків потужність водневої турбіни склала 155 кВт, економія електричної енергії – 1247 МВт·год/рік. Обрано схему ТСК з чотирма генераторами-сорберами, що забезпечує безперервну подачу водню в кількості 0,048 кг/с, кількість генераторів сорберів склала 656 шт. при загальній масі гідриду 3160 кг.
6. Застосування кисню, який отримано в процесі електролізу, при додаванні його до повітря горіння, дозволить збільшити продуктивність печі на 209 т/рік за рахунок підвищення температури горіння палива.

Список використаних джерел

1. Дзюзер В.Я. Теплотехника и тепловая работа печей: Уч.пособие, 2-е изд., испр. и доп. / В.Я. Дзюзер. – М.: Лань, 2016. – 384 с.
2. Гойхман В.Ю. Печная теплотехника в производстве стекла / В.Ю. Гойхман, В.Н. Руслов, В.А. Костырь. – Харьков: Факт, 1997. – 288 с.
3. Козлов А.С. Теплотехника регенеративных стекловаренных печей / А.С. Козлов. – М.: Легпромбытиздат, 1990. – 143 с.
4. Кошельнік О.В. Вибір ефективних конструктивних і експлуатаційних параметрів регенеративних теплообмінників скловарних печей ванного типу / О.В. Кошельнік // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2008. – № 6. – С. 17-23.
5. Энергопотребление в производстве сортового, боросиликатного и специального стекла / РОО «Эколайн». – М.: РОО «Эколайн», 2005. – 16 с.
6. Интегрированные энергосберегающие теплотехнологии в стекольном производстве: монография / Л.Л. Товажнянский, В.М. Кошельник, В.В. Соловей, А.В. Кошельник. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 628 с.
7. Клименко В.Н. Когенерационные системы с тепловыми двигателями: справочное пособие. В 3 ч. Ч. 1. Общие вопросы когенерационных технологий / В.Н. Клименко, А.И. Мазур, П.П. Сабашук. – Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2008. – 560 с.
8. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: справ. изд. / под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубавкина. – М.: Химия, 1998. – 762 с.
9. Проблемы применения водорода в энергетике / Ю.Н. Шалимов [и др.] // ISJAEE. – 2005. – № 7. – С. 21-28.
10. Варламов Г.Б. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії / Г. Б. Варламов, Г. М. Любчик, В. А. Маляренко. – К.: Політехніка, 2003. – 232 с.

11. Veziroglu T.N. Hydrogen energy system as a permanent solution to global energi-environmental problems / T.N. Veziroglu // Альтернативная энергетика и экология. – 2002. – №1. – С. 8-18.
12. Кошельнік О.В. Перспективні системи багатоступінчастої утилізації теплоти димових газів промислових скловарних печей безперервної дії / О.В. Кошельнік, О.Є. Морозов, В.М. Кошельник // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32, № 6. – С. 91-97.
13. Преспективи використання водневих утилізаційних систем в енерготехнологічних комплексах скловарного виробництва /О.В.Кошельнік, Ю.О.Недосекіна // XXV Міжн. Наукова-практична конференція «Інформаційні технології: Наука, техніка, освіта, здоров'я». (17-18 травня 2017 р). – У 4ч. Ч.1. – Харків: НТУ «ХПИ\», 2017. - С.267.
14. Научные основы создания газотурбинных установок с термохимическим сжатием рабочего тела / Ю.М. Мацевитый**,** В.В. Соловей, В.Н. Голощапов, А.В. Русанов. – Київ: Наукова думка, 2011. – 224 с.
15. Водород в металлах. В 2 т. Т.2 / под ред. Г. Алефельда и И. Фелькля. – М.: Мир, 1981. – 430 с.
16. Антонова М.М. Свойства гидридов металлов / М.М. Антонова. – Киев: Наук. думка, 1975. – 127 с.
17. Самсонов Г.В. О состоянии водорода в гидридах переходных металлов/ Г.В. Самсонов // Докл. АН СССР. – 1973. – Т. 208, № 3. – С. 621-623.
18. Свинарев С.В. Моделирование работы металлогидридного аккумулятора водорода / С.В. Свинарев, С.Н. Трушевский // ВАНТ. Сер.: Атомно-водородная энергетика и технология. – 1987. – № 3. – С. 63-64.
19. Мацевитый Ю.М. Применение водородных технологий для повышения энергоэффективности энергоблоков ТЭС в условиях дефицита природного газа / Ю.М. Мацевитый, В.В. Соловей, П.М. Канило // Вісник Інженерної академії наук. – 2007. – № 2. – С. 148-152.

20. Соловей В.В. Металлогидридные технологии. Проблемы и перспективы / В.В. Соловей, Ю.Ф. Шмалько, М.В. Лотоцкий // Проблемы машиностроения. – 1998. – Т.1, № 1. – С. 115-132.
21. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки / И.И. Перелетов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 336 с.
22. Ключников А.Д. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / А.Д. Ключников, В.Н. Кузьмин, С.К. Попов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
23. Brunklaus H. Industrieofen. Bau und Betrieb / H. Brunklaus. – Essen: Vulkan-Verlag, 1994. − 800 s.
24. Троянкин Ю. В. Проектирование и эксплуатация высокотемпературных установок / Ю.В. Троянкин. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 324 с.
25. Соловей В.В. Металлогидридная энерготехнологическая переработка водорода / В.В. Соловей // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1983. – № 3. – С. 78-81.
26. Бажан П.И. Справочник по теплообменным аппаратам / П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.М. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 364 с.
27. Производство листового стекла флоат-способом: учебное пособие / под. ред. В.И. Кондрашова. – Саратов: Саратовстройстекло, 2005. – 35 с.
28. Пат. 2333149 Российская Федерация C01B003/02, B01J007/00, C21D001/76. Способ получения газозащитной атмосферы / Брызгалов В.Н., Жмалов А.Б., Безлюдная В.С. – №2006100156/15; заявл. 10.01.06; опубл. 27.07.07, Бюл. № 4. – 4 с.
29. Кошельнік О.В. Вибір ефективних конструктивних і експлуатаційних параметрів регенеративних теплообмінників скловарних печей ванного типу / О.В. Кошельнік // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2008. – № 6. – С. 17-23.