

# ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 504.502.174:666.127(477+4-6ЄС)  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.2/16>

**Жданюк Н.В.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ АГРЕГАТИВ ДЛЯ ВАРКИ ТАРНОГО СКЛА В КРАЇНАХ ЄС

У даній роботі були вивчені еколого-технологічні характеристики скловарних печей, що використовуються у виробництві скляної тари у країнах ЄС. А також, проведений аналіз шкідливих викидів під час варіння скла у печах різних типів та вказані основні технології їх вилучення. Варіння скломаси для виготовлення скляної тари відбувається у печах безперервної дії. Найчастіше у даному секторі використовуються печі, що працюють на викопному паливі – природному газі. У виробництві скляної тари для напоїв та харчових продуктів найчастіше використовують регенеративні печі з підковоподібним напрямом полум'я. Такі печі складають більше 60 % від загальної кількості печей сектору тарного скла. У виробництві флаконів для парфумерії та косметики, також, найбільш поширеним є цей тип печей, але відсоток їх застосування нижчий та складає 50 %. У галузі широко використовуються скловарні регенеративні печі з поперечним напрямом полум'я та рекуперативні печі. Електричні та киснево-паливні печі використовуються досить рідко. Перспективними є печі, що поєднують газовий підігрів з електричним. Коефіцієнт корисної дії таких печей значно вище від печей з газовим обігрівом. На стадії варіння скла відбувається виділення реакційних газів та продуктів згоряння палива. В процесі спалювання якого утворюються такі небезпечні речовини як  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$  та інші. Також значна кількість шкідливих відходів виділяється з печей у вигляді пилу. Найефективніший спосіб зниження викидів  $CO_2$  є збільшення кількості скляного бою у сировинній суміші. На даний час на деяких заводах використовують до 80 % скляного бою у сировинній суміші. Для вилучення  $NO_x$  використовують ступінчасте спалювання палива та каталітичне і некаталітичне відновлення оксиду нітрогену до азоту. Для вилучення  $SO_2$  застосовують сухе або напівсухе очищення у поєднанні з фільтрувальною системою. Вилучення пилу здійснюється за допомогою електростатичних або традиційних рукавних фільтрів. Поєднання конструкції печі, способу її обігріву та застосування новітніх технологій вилучення небезпечних викидів забезпечує високі технологічні характеристики та екологічну безпеку виробництва скляної тари у країнах ЄС.

**Ключові слова:** скляна тара, скловарні печі, викиди  $CO_2$ , викиди  $NO_x$ , викиди  $SO_2$ , склобій.

**Постановка проблеми.** Виробництво скляної тари в країнах ЄС відбувається строго у відповідності до технологічних регламентів. Технологічна схема виробництва складається з послідовних етапів підготовки сировини, варки скла, формування виробу, його відпал, обробки поверхні, технічного контролю та пакування. В якості палива у скло-виробництві найчастіше використовується природний газ. Більшу частину викидів становлять викиди згоряння з печі, що призводить до значних викидів в атмосферу  $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ . Крім того у процесі варки скла виділяються пил, а також в незначних кількостях HCl, HF, сполуки металів, а також інші речовини. Тому дослідження умов згоряння палива, варіння скла та конструкцій

теплотехнічних агрегатів дозволить проектувати склотарні заводи із збалансованими технологічними режимами варки та знизити забруднення навколишнього середовища.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Виробництво склотари – це найбільший сектор скляної промисловості у ЄС, що складає близько 50–60 % загального об'єму виробництва скла. Використання скляної тари постійно зростає завдяки її екологічності, інертності та гігієнічності. Так, у 2005 році у країнах ЄС-25 вироблено 20 мільйонів тонн тарного скла, а у 2007 році в країнах ЄС-27 було виготовлено 22 мільйони тонн скляної тари. Проте фінансова криза та зумовлене нею скорочення споживацького попиту

у 2008 та 2009 роках призвели до скорочення виробничих потужностей [1]. Але уже в період з 2014 по 2022 рік об'єми виробництва тарного скла в Європейському Союзі (ЄС-28) стабільно зростали. Так, у 2014 році виробництво тарного скла становило 20,15 млн тонн, а у 2022 році зросло до 24,5 млн тонн (рис. 1) [2]. По даним Федерації європейських виробників скляної тари (FEVE) у 2022 році члени організації виробили загалом 95,3 млрд одиниць тарного скла [3].

У країнах ЄС скляну тару випускають кілька великих компаній (Ardagh Glass, BA Vidro, O-I Europe, Saint-Gobain, Vetropack та Vidrala) і багато менших компаній, що продовжують ефективно конкурувати завдяки існуванню регіональних та спеціалізованих ринків. ЄС є найбільшим виробником тарного скла. Найбільше заводів по виробництву тарного скла знаходиться у Німеччині, Італії, Франції, Іспанії та Польщі. Найчастіше використовують скловарені печі потужністю від 300 до 600 тонн на добу.

Наприкінці 1990-х, на початку 2000-х років у склянній промисловості ЄС проходив період активної реорганізації підприємств [1].

У галузі реалізовано багато ініціатив щодо заміни застарілого обладнання, інтенсифікації виробництва та підвищення екологічності підприємств.

**Постановка завдання.** Мета дослідження – аналіз використання теплотехнічних агрегатів для варки тарного скла в країнах ЄС. Для виконання

поставленої мети необхідно виконати наступні завдання: провести аналіз використання різних типів скловарених печей для виробництв різної продуктивності, використання різних типів палива, сировини, а також проаналізувати викиди печей у атмосферу та визначити оптимальні технології для зниження викидів.

**Виклад основного матеріалу.** Тарне скло виготовляють як правило за базовою вапняно-натрієвою рецептурою. Типовий склад тарного скла наведено у таблиці 1.

Скло вариться у теплотехнічних агрегатах – скловарених печах, що працюють на природному газу або на іншому викопному паливі. Також використовують печі з електричним обігрівом або змішаним (наприклад, газ та електричний обігрів).

Скловарні печі зазвичай розраховані на варіння великих об'ємів скла протягом типового терміну служби у 10–12 років, а у деяких випадках – до 20 років і більше. Їх продуктивність варіюється від 20 до 1000 тонн скла на добу.

Вибір технології варіння тарного скла залежить від багатьох факторів. В першу чергу враховується потужність теплотехнічного агрегату, рецептура скла, цін на паливо, інфраструктури та екологічних показників. На печах великої потужності (>500 т/добу) найчастіше використовують регенеративні печі з поперечним напрямом полум'я. На печах середньої потужності (100–500 т/добу) переважно використовують регенеративні печі з підковоподібним напрямом полум'я.

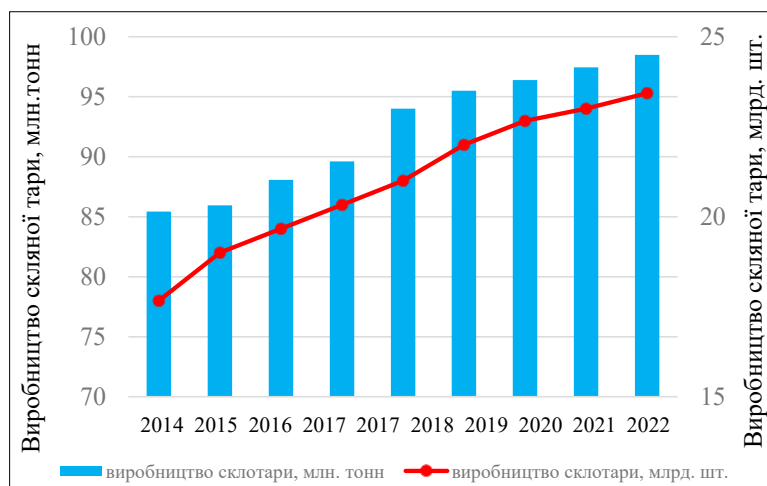


Рис. 1. Виробництво скляної тари в ЄС у період з 2014–2022 рр.

Таблиця 1

Типовий склад тарного скла

Компонент скла	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	барвники
Масова частка, %	71–73	12–14	9–12	0,2–3,5	1–3	0,3–1,5	0,05–0,3	слідові кількості

Рідше використовуються киснево-паливні або електричні скловарні печі. На установках малої потужності (25–100 т/добу) найчастіше використовують регенеративні скловарні печі з підковоподібним напрямом полум'я, рекуперативні, електричні та киснево-паливні скловарні печі. У таблиці 2 наведена оцінка типів та потужностей скловарних ванних печей безперервної дії для виготовлення скляної тари, що використовуються в країнах ЄС [1].

З метою зниження викидів у атмосферне повітря у склотарному виробництві при проектуванні технологічного процесу враховується потужність печі та регенераторів, тип енергії, що буде використовуватися в якості палива, а також прогнозоване використання скляного бою. Потужність ванних печей для виробництва пляшок та банок для харчових продуктів складає від 50 000 тонн на рік та 10 000 тонн у випадку виробництва флаконів для парфумів. Максимальні потужності печей можуть перевищувати 150 000 тонн на рік. У країнах ЄС найчастіше використовують печі потужністю 300–350 тонн/добу [1].

Як показали дані досліджень, для виготовлення скляної тари використовують, як правило, регенеративні печі з підковоподібним напрямом полум'я та з додатковим електричним обігрівом. Такі печі мають високі показники енергоефективності.

У таблиці 3 представлено статистичний розподіл печей за даними FEVE за розмірами і типами для виробництва пляшок та флаконів. Виробництво скла (у тоннах розплавленої скломаси/добу) характеризує умови експлуатації печі, що відповідають даним про викиди [1].

Там чином, для виробництва скляної тари для харчових продуктів та напоїв найчастіше використовують регенеративні печі з підковоподібним напрямом полум'я, 138 з 222, що становить більше 60 % від всіх печей. Найменш застосована технологія

варки скла з використанням киснево-паливних печей, вона складає лише 2,2 % та електрична варка, 0,45 % від загальної кількості печей. У виробничих процесах виготовлення флаконної продукції також найчастіше використовують печі з підковоподібним напрямом полум'я, що складає 50 % від всіх типів печей. Киснево-паливні та електричні печі використовуються для виготовлення скляної тари значно рідше (10 та 15 %, відповідно). Вибір типу печі базується на підвищенні ефективності та підвищенні екологічної безпеки виробництва.

Виробництво скла у країнах ЄС дуже розвинене та незважаючи на всі можливі способи зниження викидів у атмосферне повітря, частка викидів у ЄС станом на 2022 рік доволі значна (рис. 2, а) [4]. Під час роботи скловарених печей відбуваються викиди продуктів згорання вуглеводневої сировини з виділенням карбон (IV) оксиду, високотемпературного окиснення атмосферного азоту з виділенням NO<sub>2</sub> та згорання сульфурвмісної сировини з утворенням сульфур (IV) оксиду.

Викиди у атмосферу склотарних виробництв також містять пил. Він утворюється, головним чином, у результаті розпилення шихти, а також конденсації летких матеріалів у її складі. Оціночні щорічні викиди скляних виробництв ЄС в атмосферу складають з 6,5 тис. тонн пилу, 105 тис. тонн SO<sub>2</sub>, 80 тис. тонн NO<sub>2</sub> та 22 мільйонів тонн CO<sub>2</sub> і складають близько 0,8 % від загального об'єму викидів в атмосферу в ЄС (рис. 2,б) [1].

Скляна промисловість ЄС ставить перед собою завдання створювати екологічно нейтральну упаковку. Щоб досягти цього, під керівництвом FEVE (Федерація європейських виробників скляної тари) було проведено аудит викидів у атмосферу усіх типів скловарених печей. Дослідження показали, що гібридні печі оцінені як технологія, яка доповнює окремі ініціативи зі скорочення

Таблиця 2

## Оцінка типів та потужностей скловарених ванних для виробництва скляної тари в країнах ЄС

Тип печі	Кількість печей	% від загальної кількості	Продуктивність варіння скла (т/рік)	Середня продуктивність варіння скла (т/добу)
З підковоподібним напрямом полум'я	225	35,8	16 100 000	196
З поперечним напрямом полум'я	145	23,1	20 300 000	384
Електричні	43	6,85	800 000	51
Кисневі	35	5,6	1 600 000	125
Рекуперативні	120	19,1	3 300 000	75
Інші типи	60	9,55	900 000	41
Усього	628	100	43 000 000	188

## Дані про розміри та типи печей для виробництва скляної тари в країнах ЄС

Розміри печей за типами	Кількість печей	Кількість звареного скла, тонн/добу		
		Середнє	Мін.	Макс.
<b>Усі типи продукції</b>				
Усі типи печей	248	233	22	521
З поперечним напрямом полум'я, регенеративні	55	289	130	520
З підковоподібним напрямом полум'я, регенеративні	152	229	40	521
Рекуперативні	29	185	22	376
Киснево-паливні	8	180	75	305
Електричні	4	61	40	100
<b>Виробництво пляшок/банок</b>				
Усі типи печей	222	249	56	521
З поперечним напрямом полум'я, регенеративна	55	289	130	520
З підковоподібним напрямом полум'я, регенеративна	138	240	56	521
Рекуперативні	23	214	80	376
Киснево-паливні	5	242	200	305
Електричні	1	100	100	100
<b>Виробництво флаконної продукції</b>				
Усі типи печей	20	80	22	300
З підковоподібним напрямом полум'я, регенеративні	10	97	40	300
Рекуперативні	5	69	22	127
Киснево-паливні	2	76	76	76
Електричні	3	47	40	60
<b>Змішане виробництво пляшок / флаконної продукції</b>				
Усі типи печей	6	147	75	245
З підковоподібним напрямом полум'я, регенеративні	4	171	98	245

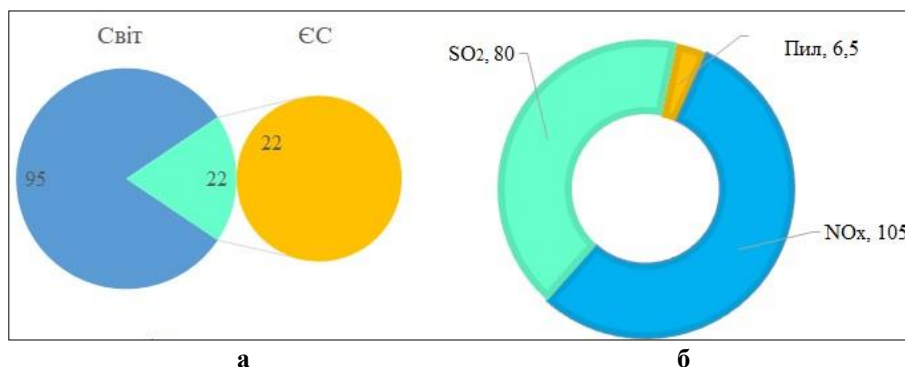


Рис. 2. Викиди у атмосферу у процесі виготовлення скла:

а) викиди CO<sub>2</sub> у світі та ЄС, млн. тонн; б) оціночні щорічні викиди пилу, скляних виробництв ЄС в атмосферу, тис. тонн

викидів карбону(IV) оксиду. Використання гібридних печей дозволяє замінити велику частку природного газу, який зараз використовується як паливо, електроенергією [5]. Щоб забезпечити майбутнє європейської скляної промисловості в замкнутій і кліматично нейтральній європейській економіці, вкрай важливо вивчити всі можливі шляхи декарбонізації. Перехід до кліматично нейтрального виробництва вимагає величезних капітальних і операційних витрат, щоб досягти цілей декарбонізації до 2050 року, встановлених Європейським кліматичним законом [6].

У таблиці 4 наведено огляд основних вхідних ресурсів та вихідних продуктів технологічного процесу проведеного FEVE для типових печей середньої потужності. [1].

За час великого переоснащення скляних заводів у галузі були впроваджені значні зміни технологічних регламентів, що дозволило суттєво знизити шкідливі викиди в атмосферу та знизити рівень споживання енергії.

Результати аналізу викидів скловарених печей показує, що найважливішим технологічним рішенням зниження викидів CO<sub>2</sub> стало

## Основні вхідні ресурси та вихідні продукти для виробництва тарного скла на одну тону скломаси

Ресурси, продукти на викиди в атмосферу	Діапазон	Середнє значення
<b>Вхідні ресурси</b>		
Скляний бій виробів, тонна	0–0,85	0,40
Кварцовий пісок, тонна	0,04–0,66	0,35
Карбонати, тонна	0,02–0,40	0,20
Мінеральні мікрокомпоненти, тонна	0,004–0,05	0,02
Енергія: мазут/газ, ГДж	4–14	6,5
Енергія: електроенергія, ГДж	0,6–1,5	0,8
Вода, м <sup>3</sup>	0,3–10	1,8
<b>Вихідні продукти</b>		
Готова упакована продукція, тонна	0,75–0,97	0,91
<b>Викиди в атмосферу</b>		
CO <sub>2</sub> , кг	300–1000	430
NO <sub>x</sub> , кг	0,2–4,4	2,0
SO <sub>x</sub> , кг	0,2–4,1	1,3
Пил (без вторинних засобів зниження викидів), кг	0,2–0,6	0,3
Пил (з вторинними засобами зниження викидів), кг	0,002–0,05	0,017
HCl (без вторинних засобів зниження викидів), кг	0,02–0,08	0,029
HCl (з вторинними засобами зниження викидів), кг	0,005–0,06	0,027
HF (без вторинних засобів зниження викидів), кг	0,001–0,022	0,007
HF (з вторинними засобами зниження викидів), кг	0,00005–0,007	0,002
Метали (без вторинних засобів зниження викидів), кг	0,0002–0,015	0,004
Метали (з вторинними засобами зниження викидів), кг	0,00006–0,002	0,001
H <sub>2</sub> O (випаровування та згорання), тонна	0,3–10	1,8

збільшення використання утилізованих відходів скла. Так, кількість вихідних газів із печі залежить від співвідношення  $m_{\text{шихти}}/m_{\text{склобою}}$  [7]. Наприклад, при використанні 1,152 кг суміші шихти та склобою, у якій вміст склобою складає 76 %, утворюється 1 кг скломаси. Різниця мас – це практично маса CO<sub>2</sub>, що виділяється внаслідок термічного розкладання карбонатів [8]. Якщо у 2008 році у країнах ЄС частка переробки скляного бою, у секторі тарного скла склала близько 50 % загального об'єму використаної сировини, то на даний час цей показник на деяких заводах сягає 80 % [6]. Але для виготовлення тари для парфумів, косметики класу люкс, а також для скляної тари для елітних алкогольних напоїв, щодо яких є високі вимоги до прозорості, велику кількість склобою не використовують, оскільки можливе внесення домішок кольорового скла [8; 9].

В процесі спалювання палива також виділяється NO<sub>2</sub>. Велика частина якого утворюється в зоні активного горіння в результаті окислення нітрогену, що міститься у паливі та у повітрі. Кількість утвореного NO<sub>2</sub> суттєво залежить від коефіцієнту надлишку повітря [7; 10]. З метою зниження вики-

дів NO<sub>2</sub> на склотарних підприємствах додатково застосовують ступінчасте спалювання палива. У горловині вльоту запалюється низькоімпульсне полум'я (близько 10 % загальної енергії), а вторинне полум'я покриває кореневу частину первинного полум'я, знижуючи температуру в його ядрі. Також застосовуються пальники, що забезпечують низький вихід NO<sub>2</sub>, модифіковані камери згорання, спеціальні конструкції печей. Використання електричного підігріву печей дозволяє суттєво знизити викиди оксиду азоту. Також дієвим способом зниження NO<sub>2</sub> є селективне каталітичне відновлення до азоту в каталітичному шарі за допомогою реакції з аміаком (зазвичай у вигляді водного розчину) за оптимальної робочої температури близько 300–450 °С. Некаталітичне відновлення – це технологія відновлення за допомогою реакції з аміаком або сечовиною за високої температури в межах 900–1050 °С [1].

До особливо токсичних газоподібних викидів скловарених печей відноситься сульфур (IV) оксид. Під час варки скла практично весь сульфур окиснюється до SO<sub>2</sub> [7; 10]. Для зниження рівня викидів SO<sub>2</sub> використовують сухе або напівсухе очищення у поєднанні з фільтрувальною системою.

Сухий порошок або суспензія чи розчин лужного реагенту вводиться у потік відхідних газів і розсіюється в ньому. Матеріал реагує з газоподібними сполуками сульфуру, утворюючи тверду речовину, що видаляється шляхом фільтрування за допомогою рукавного фільтра або електростатичного фільтра [1]. Суттєво знизити викиди SO<sub>2</sub> можна використовуючи паливо з низьким вмістом сульфуру [7].

Зниження викидів пилу із скловареної печі відбувається за допомогою електростатичних або традиційних рукавних фільтрів [1].

**Висновки.** Для виготовлення скляної тари у країнах ЄС найчастіше використовують ванні печі безперервної дії з підковоподібним напрямом полум'я. Вони складають більше 60 % від загальної кількості печей, що використовуються для виготовлення скляної тари. Найчастіше такі печі мають

потужність 300–350 тонн/добу. Такий тип печей забезпечує ефективне використання сировини та енергії, а також забезпечує високу екологічність виробництва. Для підвищення цих показників додатково доцільно додатково використовувати електричний підігрів печі та впровадження новітніх технологічних розробок для видалення пилу, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> та SO<sub>2</sub>. При розробці нових технологій виготовлення скляної тари необхідно розглядати технологічний процес як складну динамічну систему на яку впливають багато факторів: будова печі, конструкції камер для спалювання пального, типи пальників, комплекс устаткування для видалення шкідливих викидів і т.д. Таким чином, майбутнє всіх склотарних виробництв за створенням технологій, що будуть враховувати як технологічну так і екологічну складову.

#### Список літератури:

1. Довідковий документ з найкращих доступних технологій та методів управління (НДТМ) для виробництва скла / Б. М. Скалет та ін. Люксембург, 2013. 493 с.
2. Production of glass in the european union in 2022, by type. EU production of glass by type 2022. *Statista*. URL: <https://www.statista.com/statistics/1154390/production-of-glass-in-the-european-union-by-type/> (дата звернення: 28.05.2024).
3. The European container glass Industry weathered the 2022 economic tempest to record new highs in production – FEVE. *FEVE*. URL: <https://feve.org/glass-industry/data/glass-industry-production-year-2022/> (дата звернення: 28.05.2024).
4. Glass production emissions worldwide 2022. *Statista*. URL: <https://www.statista.com/statistics/1071205/carbon-dioxide-emissions-from-glass-production-worldwide/> (date of access: 28.05.2024).
5. Furnaces of the Future – FEVE. *FEVE*. URL: <https://feve.org/glass-industry/projects/furnace-future/> (date of access: 28.05.2024).
6. Griffin P. W., Hammond G. P., McKenna R. C. Industrial energy use and decarbonisation in the glass sector: A UK perspective. *Advances in Applied Energy*. 2021. Vol. 3. P. 100037. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aaden.2021.100037> (date of access: 28.05.2024).
7. Жданюк Н.В., Племянніков М.М. Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів у виробництві кераміки та скла. Паливо і його характеристики. Розрахунки горіння палива : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 62 с.
8. Papadogeorgos I., Schure K. Decarbonisation options for the Dutch container and tableware glass industry. The Hague, 2019. 54 p.
9. A review of decarbonization options for the glass industry / M. Zier et al. *Energy Conversion and Management: X*. 2021. Vol. 10. P. 100083. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100083> (date of access: 28.05.2024).
10. Жданюк Н. В., Піхуля Н. Д. Аналіз відходів і джерел забруднення скляного виробництва. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. № 1 (84). С. 9–17. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.1.1> (дата звернення: 28.05.2024).

#### Zhdaniuk N.V. ANALYSIS OF THE USE OF THERMAL ENGINEERING UNITS FOR COOKING GLASS CONTAINERS IN THE EU

*In this work, the ecological and technological characteristics of glass furnaces used in the production of glass containers in the EU countries were studied. Also, an analysis of harmful emissions during glass boiling in furnaces of various types was carried out and the main technologies for their extraction were indicated. Boiling of glass mass for the production of glass containers takes place in continuous furnaces. Furnaces operating on fossil fuel – natural gas are most often used in this sector. In the production of glass containers for drinks and food products, regenerative furnaces with a horseshoe-shaped flame direction are most often used. Such furnaces make up more than 60 % of the total number of furnaces in the container glass sector. In the production of bottles for perfumes and cosmetics, this type of furnace is also the most common, but the percentage of their use is lower and is 50 %. In the industry, glass-fused regenerative furnaces with a transverse direction of the flame and recuperative furnaces*

are widely used. Electric and oxygen-fuel furnaces are used quite rarely. Furnaces that combine gas heating with electric heating are promising. The efficiency of such stoves is much higher than gas-heated stoves. At the glass boiling stage, reactive gases and fuel combustion products are released. In the process of burning, such dangerous substances as  $CO_2$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$  and others are formed. Also, a significant amount of harmful waste is released from furnaces in the form of dust. The most effective way to reduce  $CO_2$  emissions is to increase the amount of glass battle in the raw material mixture. At present, some factories use up to 80 % of glass battle. Staged fuel combustion and catalytic and non-catalytic reduction of nitrogen oxide to nitrogen are used to extract  $NO_2$ . Dry or semi-dry cleaning in combination with a filter system is used to remove  $SO_2$ . Dust extraction is carried out using electrostatic or traditional bag filters. The combination of the design of the furnace, the method of its heating and the use of the latest technologies for the extraction of hazardous emissions ensures high technological characteristics and environmental safety of the production of glass containers in the EU countries.

**Key words:** glass containers, glass furnaces,  $CO_2$  emissions,  $NO_2$  emissions,  $SO_2$  emissions, broken glass.