

УДК 664.1.038

ПРОВЕДЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ ВИКИДІВ САТУРАЦІЙНОГО ГАЗУ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ З ВСТАНОВЛЕННЯМ ГРАНИЧНО-ДОПУСТИМИХ НОРМ ОКСИДУ І ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ

Ткаченко С. В.^{1,2}, к.т.н., старший дослідник,
с.н.с. відділу технології цукру, цукровмісних продуктів та інгредієнтів,
доцент кафедри харчових виробництв
<https://orcid.org/0000-0003-2897-8978>

Хомічак Л. М.^{1,2}, д.т.н., професор, член-кореспондент НААН, директор,
професор кафедри харчових виробництв
<https://orcid.org/0000-0001-9003-0315>

Заровний В. М.³, гол.фах. наукової групи «Компанія «Gas Security Service»
<https://orcid.org/0009-0001-4221-0204>

Шейко Т. В.¹, к.т.н., старша дослідниця,
п.н.с. відділу технології цукру, цукровмісних продуктів та інгредієнтів
<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>

Штангеев К. О.², к.т.н., доцент, завідувач кафедри харчових виробництв.
<https://orcid.org/0000-0003-2571-1119>

Скорик К. Д.², к.т.н., професор кафедри харчових виробництв.
<https://orcid.org/0009-0007-3815-7125>

Букинина Л. С.², старший викладач кафедри харчових виробництв.
<https://orcid.org/0009-0009-8351-0893>

¹Інститут продовольчих ресурсів НААН України, м. Київ, Україна²Інститут післядипломної освіти Національного університету харчових технологій, Київ, Україна³ФОП «Заровний В.М.» м. Київ, Україна<https://doi.org/10.31073/foodresources2024-23-18>

Предмет. Сучасний стан розвитку людства вимагає обґрунтованого підходу не тільки до отримання якісної конкурентоспроможної продукції, але й до зменшення кількості шкідливих викидів в навколишнє середовище внаслідок виготовлення цієї продукції. Зокрема зараз гостро стоять питання зменшення кількості шкідливих викидів вуглекислого газу (CO₂) та оксиду вуглецю (CO), що утворюються в процесі випалу вапняку у випалювальних печах цукрових заводів і містяться в сатураційному газі який застосовується в технологічному процесі отримання цукру.

Мета. Метою роботи було провести моніторингове дослідження нормативів гранично-допустимих викидів CO та CO₂ із сатураційного газу та провести екологічну оцінку цих компонентів викидів для цукрового заводу. **Методи.** Аналіз і моніторингове дослідження проводилося з використанням методичних підходів, які застосовуються у вітчизняній та міжнародній практиці. Для кількісного визначення компонентів сатураційного газу та викидів у атмосферу ми використовували сучасні електронні портативні газоаналізатори, електронний термометр та анемометр. **Результати.** Визначено, що до складу основних компонентів викидів сатураційного газу входять оксид вуглецю (II) – CO, відомий також як чадний газ, діоксид вуглецю (IV) – CO₂, вуглекислий газ, кисень – O₂, азот – N₂. Проведено узагальнення гранично допустимих нормативів викидів сатураційного газу стаціонарними джерелами у технологічному процесі цукрового виробництва. Встановлено, що вміст CO в сатураційному газі залежить від: виду і кількості палива для випалу вапняку; розміру компонентів шихти; фракційного складу вапняку і корисної висоти печі; зміщенням зону підігріву чи зони випалу в ту чи іншу сторону; гальмування відбору газу з печі. Проаналізовано, що на зменшення викидів вуглекислого газу на станції вапно-карбонізації суттєво впливає апаратурне оформлення та конструкція карбонізаторів. Запропоновано рекомендації щодо мінімізації кількості викидів вуглекислого газу і оксиду вуглецю із сатураційного газу в атмосферу та запропоновані напрями зменшення викидів CO₂ на одиницю виробленої продукції. **Сфера застосування результатів.** Цукрові підприємства одержать дані щодо оцінки викидів забруднюючих речовин та зменшення їх кількості в технологічному процесі цукрового виробництва.

Ключові слова: дифузійний сік, викиди, сатураційний газ, декарбонізація, оксид вуглецю, діоксид вуглецю, вапняк, паливо, піч, цукрове виробництво, цукор, процес, екологічна безпека, гранично допустимі викиди

CONDUCTING AN ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF THE SUGAR PLANT'S SATURATION GAS EMISSIONS WITH THE ESTABLISHMENT OF MAXIMUM PERMISSIBLE STANDARDS FOR CARBON MONOXIDE AND DIOXIDE

Serhii Tkachenko^{1,2}, PhD, Engineering, Senior Researcher, Senior Research of Department of Sugar Technology, Sugar-containing Products and Ingredients, Associate Professor of the Department of Food Production
<https://orcid.org/0000-0003-2897-8978>

Liubomyr Khomichak^{1,2}, D-r of Sc., Engineering, Professor, Corresponding member of the NAAS, Director, Professor of the Department of Food Production
<https://orcid.org/0000-0001-9003-0315>

Vasyl Zarovnyi³, Head Specialist of the Scientific Group "Gas Security Service"
<https://orcid.org/0009-0001-4221-0204>

Tamila Sheiko¹, PhD, Engineering, Senior Researcher, Leading researcher of Department of Sugar Technology, Sugar-containing Products and Ingredients,
<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>

Kostiantyn Shtanheiev², PhD, Associate Professor, Head of the Department of Food Production
<https://orcid.org/0000-0003-2571-1119>

Kostiantyn Skoryk², PhD, Professor of the Department of Food Production
<https://orcid.org/0009-0007-3815-7125>

Liudmyla Bukshyna², Senior Lecturer of the Department of Food Production
<https://orcid.org/0009-0009-8351-0893>

¹Institute of Food Resources of NAAS, Kyiv, Ukraine

²Institute of Postgraduate Education of the National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

³Private entrepreneur "Zarovnyi V.M." Kyiv, Ukraine

Subject. The current state of human development requires a reasonable approach not only to obtaining high-quality competitive products, but also to reducing the amount of harmful emissions into the environment as a result of the production of these products. In particular, there is an urgent need to reduce the amount of harmful emissions of carbon dioxide (CO₂) and carbon monoxide (CO) generated during the firing of limestone in the kilns of sugar factories and contained in the souring gas used in the technological process of sugar production. **Purpose.** The purpose of the work was to conduct a monitoring study of the maximum permissible emissions of CO and CO₂ from saturation gas and to conduct an environmental assessment of these emission components for a sugar plant. **Methods.** The analysis and monitoring study was carried out using methodological approaches used in domestic and international practice. We used modern electronic portable gas analyzers, an electronic thermometer, and an anemometer to quantify the components of saturation gas and air emissions. **Results.** It has been determined that the main components of saturation gas emissions include carbon monoxide (II) – CO, also known as carbon monoxide, carbon dioxide (IV) – CO₂, carbon dioxide, oxygen – O₂, nitrogen – N₂. The maximum permissible standards for saturation gas emissions from stationary sources in the technological process of sugar production were generalized. It is established that the CO content in the saturation gas depends on: the type and amount of fuel for limestone firing; the size of the charge components; the fractional composition of limestone and the useful height of the furnace; the displacement of the heating zone or the firing zone in one direction or another; inhibition of gas extraction from the furnace. It has been analyzed that the reduction of carbon dioxide emissions at a lime-carbonation plant is significantly influenced by the hardware design and construction of carbonizers. Recommendations for minimizing the amount of carbon dioxide and carbon monoxide emissions from the saturation gas into the atmosphere are proposed, and directions for reducing CO₂ emissions per unit of output are suggested. **Scope of results.** Sugar enterprises will receive data on the assessment of pollutant emissions and their reduction in the technological process of sugar production.

Key words: raw juice, emissions, saturation gas, decarbonization, carbon monoxide, carbon dioxide, limestone, fuel, furnace, sugar production, sugar, process, environmental safety, maximum permissible emissions

Постановка проблеми. У сучасному світі ефективний підхід до виробництва необхідний як для отримання конкурентоспроможної продукції, так і для зменшення кількості шкідливих викидів в навколишнє середовище, пов'язаних з її виготовленням [1, 2]. Особливо гостро стоїть задача замкнутого циклу виробництва та декарбонізації відходів.

Одним із основних технологічних процесів виробництва цукру є отримання технологічного вапна і пічного або сатураційного газу, які є необхідним і важливим у технологічному циклі цукрового виробництва [3-8]. Вихід і якість продукції, стабільність технологічного процесу, витрати енергії та кількість викидів забруднюючих речовин в атмосферу залежать від якості та підготовки вапняного каменю для введення у технологічний процес [3, 5, 6, 9-14].

Зокрема, актуальним є питання зменшення кількості викидів оксиду вуглецю – CO [11-13] та вуглекислого газу – CO₂ (декарбонізація відходів) [15-18], які утворюються в процесі випалу вапняку у випалювальних печах цукрових заводів і містяться в сатураційному газі, який використовується під час технологічного процесу отримання цукру. Кількість газу становить 9-10 м³ на 100 кг буряків, або ж 1,25 м³/кг випаленого вапнякового каменю [11]. Завдяки низькому вмісту кисню, газ відноситься до задушливих, а враховуючи високий вміст CO – ще й до отруйних [19].

Отруйний газ без кольору та запаху **оксид вуглецю (CO)** є продуктом неповного згорання палива [20]. Щільність CO така ж, як і у повітря. Він майже не розчиняється у воді і не вступає в хімічну взаємодію з нею.

За високих концентрацій у повітрі він потрапляє в легені та поєднується з гемоглобіном крові, блокуючи його здатність зв'язуватися з киснем. Таким чином, елементи крові перестають отримувати кисень від легенів до інших тканин організму, що призводить до кисневого голодування і смерті протягом 1-3 хв за концентрації CO 1,28% об. [20, 21].

Також оксид вуглецю негативно впливає на технологічний процес цукрового виробництва, а саме якість очищення соку, збільшує тривалість процесу карбонізації (сатурації) до 1,7-2 разів. Наприклад за вмісту в сатураційному газі 0,5% CO тривалість карбонізації збільшується на 1/3 у порівнянні з процесом без оксиду вуглецю. Газ, що вміщує 10% CO, зменшує швидкість сатурації більше ніж вдвічі. За цього доброякісність соків, як першої, так і другої карбонізації знижується, що значно погіршує якість соку та знижує продуктивність заводу [3, 11-13]. Так, вміст в пічному газі 2,0% об. CO знижує чистоту очищеного соку на 0,6%, 4,0% об. CO на 0,7%, а 10,0% об. CO на 1,2%. Крім цього гальмування процесу сатурації призводить до отримання темних утфелів, цукру сірого кольору і збільшенню вмісту цукру в мелясі [3, 13].

Вуглекислий газ (CO₂) – продукт кінцевого окислення вуглецю, також не має кольору і запаху, але має кислуватий «содовий» присмак, не горить, не підтримує горіння. Діоксид вуглецю за нормальних умов в 1,5 рази важчий за повітря [22].

Токсична дія вуглекислого газу проявляється за його вмісту у повітрі понад 3-4 % і полягає в подразненні дихальних шляхів, запамороченні, головному болю, шумі у вухах, психічному збудженні, непритомному стані, а 10-15% і більше призводить до смертельних випадків [22, 23]. За його значних концентрацій в атмосфері посилюється парниковий ефект [24].

Численні дослідження показали, що коефіцієнт утилізації діоксиду вуглецю сатураційного газу в більшості сучасних сатураторів становить від 56 до 70% [9, 25]. Як наслідок, після сатурації відпрацьований газ потрапляє в атмосферу у вигляді шкідливих викидів, що містять діоксид вуглецю.

Для заводу потужністю 3000 т/добу за витрати вапна 2,0% CaO до кількості буряку викидається в атмосферу в середньому 435 кг CO₂ або 213 м³ чистого діоксиду вуглецю щодня [11].

З 1 січня 2021 року набув чинності закон «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів». Цей документ підтверджує наміри України щодо боротьби зі зміною клімату, викладені в Паризькій угоді 2016 року [26].

Однією з найважливіших новацій закону є впровадження системи торгівлі квотами на викиди парникових газів, а також створення основ для функціонування системи

моніторингу, звітності та верифікації викидів (МЗВ). По суті, Держекоінспекція буде мати доступ до інформації про тих, хто забруднює навколишнє середовище, коли та в якій кількості.

Нова система має на меті отримати точну інформацію про викиди парникових газів від виробничих установок; контролювати викиди та обмежувати їх; і впровадити обов'язкову схему розрахунку викидів для всіх виробничих установок.

Держекоінспекція перевірятиме всі вищезазначені критерії в планах викидів і моніторингу. Крім того, найцікавіше те, що інспекція може розпочати позапланові перевірки, щоб переконатися, що інформація, представлена у планах або звітах, є правдивою.

Тому питання зменшення шкідливих компонентів у викидах і визначення їх об'єктивної кількості є актуальними для промисловості та соціально важливими для людства.

Гранично допустимі викиди компонентів забруднюючих речовин встановлюються екологічною службою відповідно дозволу на викиди в атмосферне повітря забруднюючих речовин стаціонарними джерелами, що розробляються для кожного підприємства окремо.

Як правило для цукрових заводів відповідно до дозволу на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами встановлені гранично допустимі викиди по оксиду вуглецю (CO), що наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

**Гранично допустимі викиди по оксиду вуглецю
для сатураторів цукрового заводу**

Нормативний показник	Джерело викидів №2 – Сатуратор №1	Джерело викидів №3 – Сатуратор №2
CO, мг/м ³	250	250
CO, г/с	0,463005	0,484831

Такий нормативний показник для CO (250 мг/м³) регламентований наказом Мінприроди від 22.10.2008 №541 «Про затвердження технологічних нормативів допустимого викиду забруднюючих речовин із

теплосилових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт» [27].

Відповідно до якого масова концентрація забруднюючих речовин у газах, що відводяться від окремого типу обладнання (котли) у місці їх виходу з устаткування (або газоочисного обладнання, яке встановлене безпосередньо за джерелом утворення викидів) не повинні перевищувати технологічних нормативів.

Відповідно до “Методичних рекомендацій щодо оформлення дозволу на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами для суб'єктів господарювання з урахування технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря” (Затверджених наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 17.09.2010 № 407) [28] технологічний норматив допустимого викиду забруднюючої речовини - гранична масова концентрація забруднюючої речовини у місці виходу відхідних газів з установки, устаткування або після газоочисного устаткування, яке встановлене безпосередньо за технологічним обладнанням.

Цей норматив виражається в міліграмах на кубічний метр (мг/м³) за стандартних умов у відхідних газах. Технологічні нормативи стосуються стаціонарних сталих режимів роботи устаткування, передбачених технологічним регламентом виробництва.

Разом з цим в дозволах на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами дають посилання на наказ Міністерство Екології та Природних Ресурсів України від 01.07.2015 №260 «Про затвердження Технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин із устаткування (установки) для виробництва вапна в обертових випалювальних печах, виробнича потужність яких перевищує 50 тонн на день, або в інших печах, виробнича потужність яких перевищує 50 тонн на день» [29].

Відповідно до якого масова концентрація оксиду вуглецю не повинна перевищувати таких значень технологічних нормативів допустимих викидів для шахтних печей зі змішаним подаванням – 15 000 мг/м³.

Таким чином для пічного газу встановлений технологічний норматив допустимих викидів відповідно до законодавства – 15000 мг/м³ для труби шахтної печі зі змішаними подаванням [29]. Оскільки очищений та охолоджений пічний газ є сатураційним газом і він же є відпрацьованим сатураційним газом після сатураторів (викиди) [3–6, 9–12, 30]. То варто допустимі викиди з сатураторів та викиди надлишку сатураційного газу розглядати в контексті технологічного нормативу допустимих викидів – 15000 мг/м³.

Згідно до методики розрахунку розмірів відшкодування збитків, які заподіяні державі в результаті наднормативних викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря (Затвердженої наказом Міністерства енергетики та захисту довкілля України 28 квітня 2020 року № 277) Пункт 1.5.[31] затверджений граничнодопустимий викид для стаціонарних джерел викидів, які віднесені до основних, може виражатись в мг/м³ та г/с, а для джерел викидів віднесених до інших, в мг/м³. Тобто розраховується також масова витрата викиду в г/с.

Масова витрата (потужність викиду), q_m – кількість речовин, що викидається в атмосферне повітря за одиницю часу, г/с. Масова витрата розраховується як добуток об'ємної витрати газу приведеної до нормальних умов q_v (м³/с) на масову концентрацію викиду (мг/м³).

У табл. 2. наведено узагальнені дані складу сатураційного газу по цукрових заводах України [12].

Таблиця 2

Склад сатураційного газу за випалу вапняку

Нормативні дані	Фактичні дані
CO ₂ – 36,0–40,0% об.	CO ₂ – 26,0–38,0–40,0% об.
O ₂ – не більше 1,8–2,0% об.	O ₂ – 2,5–7,0% об.
CO – не більше 0,6–1,0% об.	CO – 0,5–3,0% об.
N ₂ – 57,0–61,6% об.	NO ₂ – 50,0–71,0% об.

Якщо перерахувати нормативні дані з таблиці 2 по вмісту CO (0,6–1,0% об.) з врахуванням того, що об'ємна витрата газу приведена до нормальних умов $q_v=0,9$ м³/с, то будемо мати масову концентрацію викиду за нормальних умов – 7500–

12500 мг/м³ або масову витрату (потужність) викиду – 6,7–11,1 г/с.

Як видно з результатів розрахунків, масова концентрація викиду за нормальних умов – 7500–12500 мг/м³ відповідає значенню технологічних нормативів допустимих викидів для шахтних печей зі змішаним подаванням – 15000 мг/м³ [29], а масова витрата (потужність) викиду – 6,7–11,1 г/с не відповідає нормативу для CO ($\approx 0,5$ г/с, табл. 1). Тому така граничнодопустима витрата у дозволі є заниженою і не відповідає дійсності технологічного процесу випалу вапняку в шахтних печах із змішаним подаванням шихти та потребує корегування в дозволах на викиди, що розробляються для цукрових заводів.

Вище вже зазначалося, що допустимі викиди з сатураторів та викиди надлишку сатураційного газу варто розглядати в контексті технологічного нормативу допустимих викидів. Тому для визначення дійсної масової витрати викиду в г/с (в дозволах ця витрата проходить як граничнодопустимий викид, є заниженою і не відповідає дійсності (табл. 1), що буде визначатись через об'ємну витрату газу приведеної до нормальних умов q_v (м³/с) і залежати від хімічного складу вапнякового каменю, кількості палива, добової продуктивності печі тощо, варто проводити еколого-технологічний аудит вапняно-газового відділення, який ґрунтується на таких складових:

- матеріальний баланс вапняного відділення, що на основі хімічного складу вапнякового каменю, якісних показників дифузійного соку, продуктивності заводу, кількості шихти для випалу, активності вапняного молока, дозволить визначити питомі

витрати вапняку на технологічні потреби, кількість активного вапна поданого в завод, витрати вапна на переробку буряку, добову продуктивність вапняного відділення;

- визначення об'єму пічного газу, що на основі хімічного складу вапнякового каменю, кількості палива, кількісного складу компонентів сатураційного газу (CO , CO_2 , O_2 , N_2), продуктивності вапняного відділення, дозволить визначити об'єм CO_2 від розкладу CaCO_3 вапняку, об'єм CO_2 від розкладу MgCO_3 вапняку, об'єм CO_2 від згорання палива, загальний об'єм CO_2 , добову продуктивність печі по пічному газу;

- визначення шкідливих викидів в атмосферу (CO , CO_2) із відпрацьованим сатураційним газом, що на основі кількісного складу компонентів сатураційного газу (CO , CO_2 , O_2 , N_2) до та після сатурації та добової продуктивності печі по пічному газу, дозволить визначити дійсну кількість вуглекислого газу та оксиду вуглецю, що виходить в атмосферу;

- на основі аналізу результатів оцінювання за такою методикою можна буде дати чіткі рекомендації щодо зменшення викидів шкідливих компонентів CO_2 та CO в атмосферу які будуть ґрунтуватись на налагодженні технологічного процесу випалу вапняку у печі, точній дозі палива у шихті, що буде відповідати необхідній мінімальній кількості для випалу вапняку з відповідною кристалічною структурою та хімічним та фракційним складом, використання якісного палива відповідного фракційного складу для випалу, раціональній конструкції сатураторів, що відповідає продуктивності виробництва та забезпечує максимальний коефіцієнт утилізації CO_2 .

Нині нормативи на викиди вуглекислого газу в Україні відсутні, але передбачено, що ставка екологічного податку за викиди двоокису вуглецю становить 30 грн за 1 тону (п. 243.4 [32]). Така ставка досі залишиться найнижчою в Європі (за виключенням Польщі) порівняно з іншими країнами: до прикладу у Швеції ставка (є найвищою) становить \$137/т CO_2 , в Швейцарії – \$101/т CO_2 , Фінляндії – \$62/т CO_2 , Норвегії – \$69/т CO_2 , Франції – \$52/т CO_2 , Нідерландах – \$35/т CO_2 , Португалії – \$28/т CO_2 , в Україні ж, відповідно, – \$1,1/т CO_2 . [33].

Зараз у світі ведеться серйозна робота по обліку і зменшенню викидів вуглекислого газу у цукровій промисловості на одиницю виробленої продукції (декарбонізація) за рахунок застосування технологій «рециклінгу» [15-18] та вловлюванню діоксиду вуглецю в спеціальні сховища [34]. Перспективними серед таких розробок є: утилізація CO_2 шляхом отримання карбонату амонію із аміачних розчинів [15]; можливість вдування чистого CO_2 на сатурацію за наявності на заводі дільниці отримання біоетанолу, де CO_2 є відходом із вмістом останнього майже 95%, а кількість його дорівнює кількості отриманого біоетанолу [35] або отримання CO_2 шляхом випалу фільтраційного карбонізованого осаду [17, 36] який є відходом виробництва.

Матеріали та методи. Аналіз і моніторингове дослідження проводилося з використанням методичних підходів, які застосовуються у вітчизняній та міжнародній практиці. Для кількісного визначення компонентів сатураційного газу та викидів у атмосферу ~~ми~~ використовувались сучасні електронні портативні газоаналізатори, електронний термометр та анемометр, що були люб'язно надані авторам в користування представниками наукової групи «Компанія «Gas Security Service»». В газоаналізаторах застосовуються інфрачервоний датчик (NDIR) для визначення CO_2 та електрохімічні датчики для визначення CO та O_2 .

Результати та обговорення. Аторами було проведено комплексний еколого-технологічний аудит на вапняно-газовому відділенні одного з цукрових заводів у західному регіоні України. Деякі елементи аудиту наведені на рисунку 1 і в таблиці 3.

За результатами цього аудиту було виявлено низку недоліків роботи печі. Графічна інтерпретація ситуації, що склалася, представлена на рисунку 1.

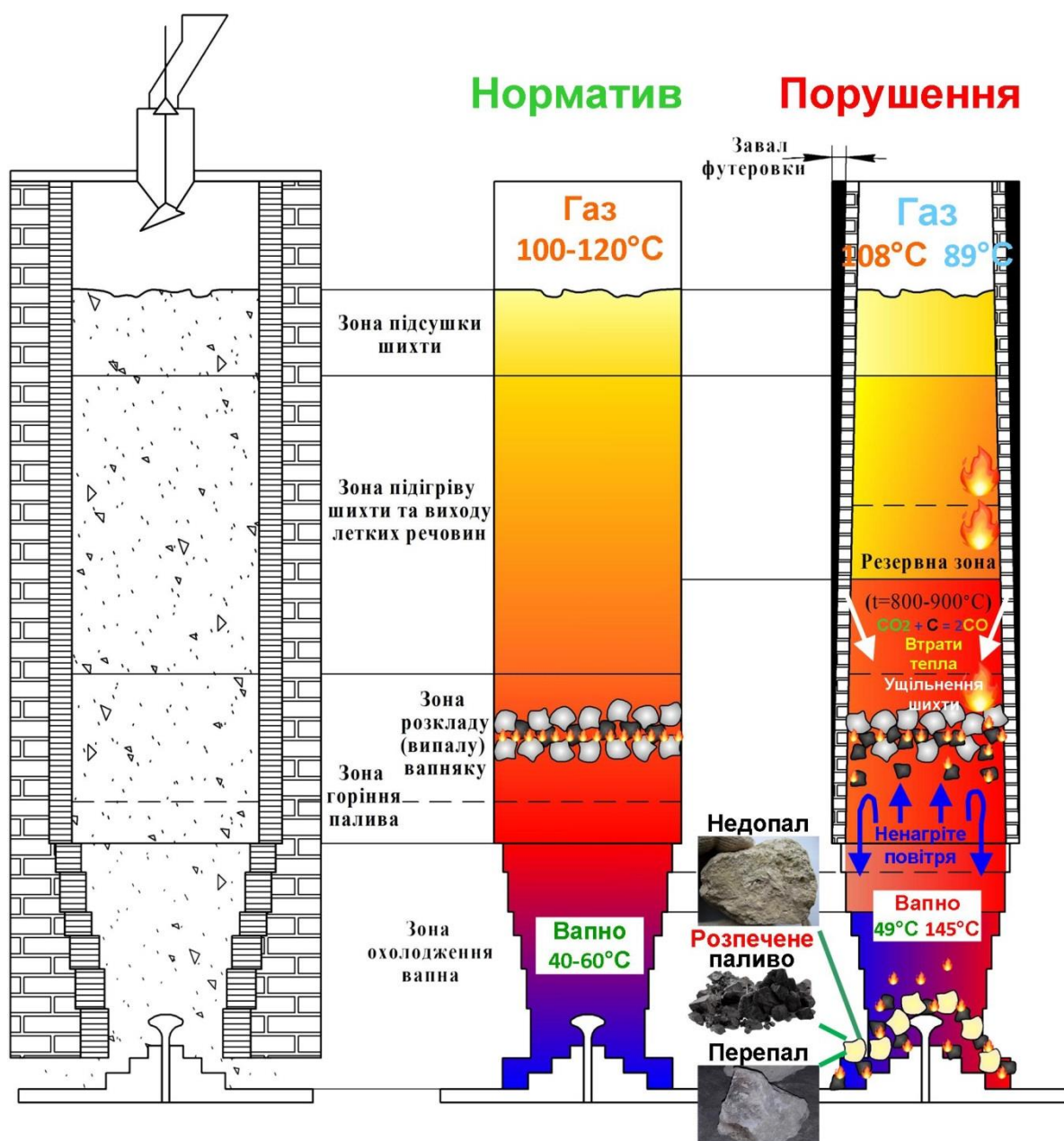


Рис. 1. Графічна інтерпретація недоліків роботи печі для випалу вапняку, що отримана в результаті виконання еколого-технологічного аудиту вапняно-газового відділення

З аналізу отриманих даних по аудиту, що наведені на рисунку 1 виокремлено такі недоліки:

- часткова невідповідність фракції вапняку, що потрапляє на випал, корисній висоті печі;
- незадовільно організований відсів шихти, що не забезпечує відсів необхідної фракції дріб'язку;
- невідповідність співвідношення фракції палива і вапняку, що надходить на випал;
- додаткове ущільнення шихти за рахунок завалу футеровки.
- як наслідок ущільнення шихти та недостатня кількість повітря для випалу вапняку;
- як наслідок, перекош зони горіння палива;
- як наслідок, зміщення зони горіння вниз;

Ситуація, що склалася призводить до утворення значної кількості CO у сатураційному газі, пічному газі та викидах з сатураторів. Таблиця 3 містить результати визначення кількості шкідливих викидів із відпрацьованого сатураційного газу в

атмосферу. Значення, що вказані в таблиці є середніми значеннями з п'яти паралельних вимірів, що не перевищують похибку від середнього значення не більше ніж на 10%.

Таблиця 3

**Результати визначення кількості шкідливих викидів в атмосферу
із відпрацьованим сатураційним газом**

№ з/п	Найменування показника	Усереднене значення в сумі по 2-печах	Одиниці виміру
I Сатурація			
1.	Кількість CO ₂ , що виходить в атмосферу	12,702±0,0520	т/добу
		0,530±0,0022	т/год
		147,014±0,6111	г/с
2.	Кількість CO, що виходить в атмосферу	3,383±0,0110	т/добу
		0,141±0,0005	т/год
		39,154±0,1273	г/с
II Сатурація			
3.	Кількість CO ₂ , що виходить в атмосферу	14,574±0,0480	т/добу
		0,608±0,0020	т/год
		168,683±0,5560	г/с
4.	Кількість CO, що виходить в атмосферу	2,095±0,0150	т/добу
		0,087±0,0006	т/год
		24,239±0,1736	г/с

Із аналізу даних таблиці 2 видно, що кількість CO₂, що виходить в атмосферу з апарату I сатурації становить 147,014±0,6111 г/с, відповідно кількість CO – 39,154±0,1273 г/с. Кількість CO₂, що виходить в атмосферу з апарату II сатурації становить 168,683±0,5560 г/с, відповідно кількість CO – 24,239±0,1736 г/с.

В даному випадку це пов'язано з поганим відсівом компонентів шихти від дріб'язку та пилю, а також неправильним співвідношенням фракції палива. Причинами цього є: невідповідність фракції вапняку корисній висоті печі, надмірне використання палива, поява резервної зони та зміщення зони горіння вниз печі. Через це паливо «просипається» через всю шахту печі, що призводить до значної втрати палива через механічний недопал. Шматки палива, що провалилися, будуть частково догорати в зоні охолодження, що збільшує температуру вапна, що вивантажується.

На додаток до цього спостерігається перекис зони горіння, про що свідчить різна температури випаленого вапна та пічного газу по поздовжньому перерізі печі. Цей перекис був результатом попадання дріб'язку за завантаження печі і хаотичного «просипання» його по всій висоті печі, оскільки робота розподільного пристрою за завантаження шихти була задовільною.

Крім того, було встановлено, що футеровка печі «похилилася» всередину шахти печі. Нахилена футеровка буде давити на шихту в печі, збільшуючи її ущільнення. Це призвело до того, що повітря не може потрапити на випал вапняку та стабілізувати положення зони горіння. У результаті цього ситуація значно погіршується.

За рахунок всього цього збільшується довжина зони горіння, з'являється резервна зона і відповідно маємо збільшення кількості CO, оскільки підвищений вміст CO обумовлений реакцією відновлення CO₂ на поверхні розпеченого палива, що відбувається у вузькій зоні яка знаходиться на межі зони випалу та зони підігріву (t=800-900°C) [4–6, 11, 12].



Високий вміст CO у викидах в атмосферу, на пряму залежить від його вмісту у складі пічного газу і сатураційного газу. Тому, в першу чергу, необхідно виконати рекомендації щодо налагодження режиму випалу вапнякового каменю:

- забезпечити фракцію вапняку відповідну висоті печі. Оскільки на випал разом з крупнофракційним вапняком надходить дрібна фракція, то варто відрегулювати розмір вічок сита вапняку таким чином, щоб забезпечити розмір фракції для випалу наближену до 80x150 мм, менше потрібно відсівати;

- забезпечити відповідну фракцію палива, оскільки на випал надходить дрібна фракція палива, то варто відрегулювати розмір вічок сита відсіву палива таким чином щоб забезпечити розмір фракції для випалу наближену до 30x80 мм, менше 30 мм необхідно відсівати, більше 80 подрібнювати;

- необхідно забезпечити співвідношення фракції палива і вапняку, для коксу – 1:2. Якщо врахувати, що в середньому розмір фракції вапняку складає 80x120 то розмір фракції палива має бути не менше 40x60;

- обов'язково у ремонтний період усунути «завалювання» футеровки печі.

Зниження концентрації оксиду вуглецю в пічних газах має велике практичне значення [6]. Зокрема, за згоряння 1 нм3 CO виділяється 3045 ккал тепла. Якщо у вихідних газах міститься 2% об. CO, а об'єм газів на 1 т вапна складає 2000 нм3, то об'єм оксиду вуглецю в пічному газі буде:

$$V_{CO}=2000 \times 0,02=40 \text{ нм3}, \quad (2)$$

За згоряння цієї кількості CO може виділитись $40 \times 3045 = 121800$ ккал, що рівноцінно $121800/7000=17,4$ кг умовного палива.

Отже зниження вмісту CO в газах на 1% може зберегти приблизно 8,7 кг умовного палива на 1 т вапна [6].

Для зменшення шкідливих викидів в атмосферу діоксиду вуглецю слід:

- встановлювати сатуратори сучасної конструкції з високим коефіцієнтом утилізації CO₂ [25, 37–39];

- встановлювати на комунікаціях викидів в атмосферу з карбонізаторів відпрацьованих сатураційних газів спеціально сконструйованих пристроїв для додаткової утилізації CO₂ і тепла [12, 17];

- утилізувати CO₂ шляхом отримання карбонату амонію із аміачних розчинів [15] з подальшим його використанням в якості компоненту сільськогосподарських добрив [40];

- забезпечити можливість вдування чистого CO₂ на сатурацію за наявності на заводі дільниці отримання біоетанолу, де вуглекислий газ є відходом із вмістом майже 95% [12, 35];

- для зменшення кількості вуглекислого газу на одиницю виробленої продукції, отримувати CO₂ шляхом випалу фільтраційного карбонізованого осаду [17, 36], що є відходом виробництва.

Висновки. Таким чином, для пічного газу встановлений технологічний норматив допустимих викидів відповідно до законодавства – 15000 мг/м³. Оскільки очищений та охолоджений пічний газ є сатураційним газом і він же є відпрацьованим сатураційним газом після сатураторів (викиди). То доцільно допустимі викиди CO з сатураторів розглядати в контексті технологічного нормативу допустимих викидів – 15000 мг/м³.

Крім усунення недоліків роботи печей цукрових заводів, необхідно розробити нові дозволи на викиди, які будуть відображати реальні нормативи викидів забруднюючих речовин для стаціонарних джерел викидів, таких як сатуратори. Такі дозволи повинні бути узгоджені і розроблені разом з екологічною службою. Оскільки викиди забруднюючих речовин, таких як CO, із сатураторів можуть становити до 1% об., навіть у печі, яка працює нормально і має правильний технологічний режим випалу вапняку. Це означає, що загальна кількість викидів CO може становити приблизно 20 г/с.

З метою зменшення шкідливих викидів в атмосферу CO₂ слід цукровим підприємствам взяти курс на застосування технологій «рециклінгу», що дозволять зменшити його викиди на одиницю виробленої продукції.

Розроблено рекомендації щодо налагодження режиму випалу вапнякового каменю, отримані на основі еколого-технологічного аудиту вапняно-газового відділення. Це дозволить адаптувати викиди забруднюючих речовин CO та CO₂ цукрових заводів до вимог Європейських нормативів.

Зменшення витрат на викиди вуглекислого газу (CO₂), що міститься в сатураційному газі, який використовується в технологічних процесах цукробурякового виробництва, а також зменшення суми штрафів за перевищення викидів оксиду вуглецю (CO) разом із відпрацьованим сатураційним газом, матиме позитивний вплив на економіку цукрового заводу.

Бібліографія

1. CEFS position paper: the path to carbon neutrality by 2050 must be supported by solid legal and financial tools, p. 6. European Association of Sugar Manufacturers. Brussels. 07.09.2020. [Електронний ресурс]. (дата звернення 13.08.2024). <https://cefs.org/wp-content/uploads/2020/09/CEFS-position-paper-on-carbon-neutrality.pdf>.
2. CEFS EFFAT Joint statement on just-transition: Just transition in the EU beet sugar sector EFFAT-CEFS joint statement, p. 2. European Association of Sugar Manufacturers. Brussels. 24.05.2024. [Електронний ресурс]. (дата звернення 13.08.2024). <https://cefs.org/wp-content/uploads/2024/05/CEFS-EFFAT-Joint-statement-on-just-transition.pdf>.
3. Верченко Л. М. Влияние компонентов сатурационного газа и режимов получения известкового молока на качество соков свеклосахарного производства : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.05 «Технология сахаристых веществ». Верченко Лидия Михайловна. Киев: ВНИИСП 1989. 202 с.
4. Панов В. В., Науменко В. Д., Баранов В. И. Совершенствование работы известкового отделения сахарных заводов. К.: ИПДО НУПТ, 2004. 76 с.
5. Верченко Л. М., Кос Т. С., Василів В. П. Карбонатна сировина та паливо для одержання вапна в цукровому виробництві. Цукор України. 2011. № 9–10. С. 28–36.
6. Штангеев К. О. Отримання вапна та сатураційного газу: Звіт проекту «Підвищення енергоефективності та стимулювання використання відновлюваної енергії в агро-харчових та інших малих та середніх підприємствах України», що виконується Агенством ООН з питань промислового розвитку (ЮНІДО) за підтримки Глобального Екологічного Фонду. К.: ЮНІДО, 2015. 61 с.
7. Vyerchenko L., Tkachenko S., Sheiko T., Kos T., Dzhohan O., Vasuliv V. The Study of Calcium Hydroxide Structure and its Physico-Chemical and Electrokinetic Properties in Sugar Production. Chemistry & Chemical Technology. 2019. 13. P. 477–481. <https://doi.org/10.23939/chcht13.04.477>.
8. Alaghbary, Adeeb Carbonation Process in Sugar Refinery. ResearchGate. 2024 <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33538.90564>.
9. Верченко Л. М., Кос, Т. С. Методика розрахунку шкідливих викидів в атмосферу із відпрацьованим сатураційним газом. Цукор України. 2010. № 4. С. 42–45.
10. Пономаренко В. В., Пушанко М. М., Лементар С. Ю., Люлька Д. М. Очисник сатураційного газу. Цукор України. 2014. № 12. С. 11–13.
11. Хомічак Л. М., Верченко Л. М., Петриченко І. Б., Резніченко Ю. М. Технологічне вапно, сатураційний газ і екологія: сучасні реалії: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку цукрової промисловості України», 31 березня – 1 квітня 2016 рр.. Київ: НУХТ, 2016. С. 33–35.
12. Хомічак Л. М., Верченко Л. М., Петриченко І. Б., Резніченко Ю. М. Взаємовплив функціонування вапняно-газової печі і станції вапнокарбонізації на ефективність роботи заводу та екологію навколишнього середовища. Цукор України. 2017. № 2. С. 16–18.
13. Верченко Л. М., Шевцов Л. Д. Вплив оксиду вуглецю (CO) на процес карбонізації та якісні показники соків. Цукрова Галузь. Науково-інформаційний вісник. Жовтень 2017. № 4. С. 5–10.

14. Верченко Л. М., Педос А. Г. Вплив кисню карбонізаційного газу на якість соків цукрового виробництва. Цукрова Галузь/Науково-інформаційний вісник. Листопад 2017. № 5. С. 5–9.
15. Lixiao Luo, Wei Zhang, Yu Zhang, Dongdong Feng, Yuzhi Li, Xishan Zhu, Haibo Ye, Weichong Chen, Yingsen Qin Study on life-cycle carbon emission accounting of cane sugar products based on ammonia-based CO₂ capture method. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2024. Volume 68. 103858. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103858>.
16. Kuo Li, Mingyue Zhao, Yingchun Li, Yutong He, Xue Han, Xin Ma, Fen Ma, Spatiotemporal Trends of the Carbon Footprint of Sugar Production in China. Sustainable Production and Consumption. 2024. Volume 46. P. 502–511. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.03.010>.
17. Bahamin Bazooyar, Ali Nabavi, Peter Clough, Edward J. Anthony, Vasilije Manovic, Towards decarbonisation of sugar refineries by calcium looping: Process integration, energy optimisation and technoeconomic assessment. Energy Conversion and Management. 2024. Volume 314. 118597. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118597>.
18. Hannah Green, Peter Larsen, Yang Liu, Paul N. Nelson, Carbon dioxide removal via weathering of sugarcane mill ash under different soil conditions. Applied Geochemistry. 2024. Volume 165. 105940. ISSN 0883-2927. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.105940>.
19. Folprechtova A., Hanslian L. A rather rare case of carbon monoxide poisoning in a sugar mill. Pracovni Lekarstvi. 1979. 31 (4), P. 141–143.
20. Окис вуглецю (чадний газ). [Електронний ресурс]. (дата звернення 13.08.2024). <https://empendium.com/ua/chapter/B27.II.20.10>.
21. Опара Н. М., Дударь Н. І. Чадний газ: вплив на організм людини, способи індивідуального захисту і безпечної поведінки. Аспекти безпеки праці, життя та довкілля людини : тези доповідей VI регіональної міжвузівської науково-практичної конференції 28 березня 2013 р.. Полтава : ПДАА, 2013. С. 42–45.
22. Діоксид вуглецю. [Електронний ресурс]. (дата звернення 13.08.2024). https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D1%96%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B4_%D0%B2%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B5%D1%86%D1%8E.
23. Як CO₂ впливає людину при надлишку в приміщенні?. [Електронний ресурс]. (дата звернення 13.08.2024). <https://ventbazar.ua/uk/blog/chto-takoye-co2>.
24. De Figueiredo, E.B., Panosso, A.R., Romão, R. et al. Greenhouse gas .emission associated with sugar production in southern Brazil. Carbon Balance Manage. 2010. 5(1):3. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-5-3>.
25. Виговський В. Ю., Хомічак Л. М., Петриченко І. Б., Калініченко О. М., Белостоцький Л. Г. Підвищення ефективності роботи сатураторів цукробурякового виробництва. Цукор України. 2002. № 2. С. 1–9.
26. Закон України про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів. [Електронний ресурс]. (дата звернення 13.08.2024). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/377-20>.
27. Наказ Мінприроди від 22.10.2008 №541 «Про затвердження технологічних нормативів допустимого викиду забруднюючих речовин із теплосилових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт». [Електронний ресурс]. (дата звернення 13.08.2024) <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1110-08#Text>.
28. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 17.09.2010 № 407 “Методичних рекомендацій щодо оформлення дозволу на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами для суб’єктів господарювання з урахування технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря”. [Електронний ресурс]. (дата звернення 13.08.2024). <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0407617-10#Text>.
29. Наказ Міністерства Екології та Природних Ресурсів України від 01.07.2015 №260 «Про затвердження Технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин із устаткування (установки) для виробництва вапна в обертових випалювальних печах, виробнича потужність яких перевищує 50 тонн на день, або в інших печах, виробнича потужність яких перевищує 50 тонн на день». [Електронний ресурс]. (дата звернення 13.08.2024). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0878-15#Text>.
30. Верченко Л. М., Кос, Т. С. Методика розрахунку кількості пічного газу, який виходить із вапняної печі та подається на сатурацію. Харчова промисловість. 2010. № 9. С. 5-7.

31. Наказ Міністерства енергетики та захисту довкілля України від 28.04.2020 року № 277) “Про затвердження Методики розрахунку розмірів відшкодування збитків, які заподіяні державі в результаті наднормативних викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря”. [Електронний ресурс]. (дата звернення 13.08.2024). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0414-20#Text>.

32. Податковий кодекс України. [Електронний ресурс]. (дата звернення 13.08.2024). https://ips.ligazakon.net/document/t10_2755?an=23866.

33. Чи вплине збільшення податку на CO₂ на екологічний стан в країні? [Електронний ресурс]. (дата звернення 13.08.2024). <https://razumkov.org.ua/statti/chy-vplyne-zbilshennia-podatku-na-so2-na-ekologichnyi-stan-v-kraini>.

34. Divya Baskaran, Panchamoorthy Saravanan, L. Nagarajan, Hun-Soo Byun, An overview of technologies for capturing, storing, and utilizing carbon dioxide: Technology readiness, large-scale demonstration, and cost. Chemical Engineering Journal. 2024. Volume 491. 151998, ISSN 1385-8947. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151998>.

35. Данілова, К. О. Дослідження процесу карбонізації вапнованого дифузійного соку в цукровому виробництві. Продовольчі ресурси. 2023. 11 (21). С. 73–83. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-07>.

36. Хомічак Л. М., Кузнєцова І. В., Зайчук М. В., Джоган О. І., Зайчук Л. П., Бондар М. В. Дослідження термічно модифікованого дефекату та його застосування для очищення транспортерно-мийної води. Продовольчі ресурси. 2023. 11 (21). С. 159–166. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-16>.

37. Хомічак Л. М. Наукове обґрунтування та розроблення способів очищення дифузійного соку: дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.05 «Технологія цукристих речовин» / Хомічак Любомир Михайлович. Київ. НУХТ, 2003. 447 с.

38. Хомічак Л. М., Петриченко І. Б., Виговський В. Ю. Проведення першої сатурації в апараті з внутрішніми секційними циркуляційними контурами. Харчова промисловість. 2001. № 1. С. 57–59.

39. Виговський В. Ю., Хомічак Л. М., Петриченко І. Б., Калініченко О. М., Мірошник В. О., Скорик К. Д. Вплив конструкційних елементів сатуратора на кратність циркуляції. Цукор України. 2011. № 4. С. 38–42.

40. Sugumar Mohanasundaram, Venkatramanan Varadharajan, Mayakannan Selvaraju, Sivasubramanian Manikandan, Subbaiya Ramasamy, Mani Jayakumar, Venkatesa Prabhu Sundramurthy, Gurunathan Baskar, Arivalagan Pugazhendhi, Green ammonia as peerless entity for realm of clean-energy carrier toward zero carbon emission: Purviews, neoteric tendencies, potentialities and downsides. Fuel. 2024. Volume 365. 131118. ISSN 0016-2361. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131118>.

References

1. CEFS position paper: the path to carbon neutrality by 2050 must be supported by solid legal and financial tools, p. 6. European Association of Sugar Manufacturers. Brussels. 07.09.2020. [Elektronnyi resurs]. (data zvernennia 13.08.2024). <https://cefs.org/wp-content/uploads/2020/09/CEFS-position-paper-on-carbon-neutrality.pdf>.

2. CEFS EFFAT Joint statement on just-transition: Just transition in the EU beet sugar sector EFFAT-CEFS joint statement, p. 2. European Association of Sugar Manufacturers. Brussels. 24.05.2024. [Elektronnyi resurs]. (data zvernennia 13.08.2024). <https://cefs.org/wp-content/uploads/2024/05/CEFS-EFFAT-Joint-statement-on-just-transition.pdf>.

3. Verchenko L. M. (1989) Vliyanie komponentov saturatsionnogo gaza i rezhimov polucheniya izvestkovogo moloka na kachestvo sokov sveklosakharnogo proizvodstva : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.18.05 «Tekhnologiya sakharistikh veshchestv» [Influence of components of saturation gas and regimes of lime milk production on the quality of juices beet sugar production : diss. ... Candidate of Technical Sciences : 05.18.05 "Technology of sugars sugar substances"]/ Verchenko Lidiya Mikhailovna. Kiev: VNIISP. 202 p. [in Ukrainian].

4. Panov V. V., Naumenko V. D., Baranov V. I. (2004). Sovershenstvovanie raboti izvestkovogo otdeleniya sakharikh zavodov [Improvement of operation of the lime department of sugar factories]. Kiev: IPE NUFT. 76 p. [in Ukrainian].

5. Vierchenko L. M., Kos T. S., Vasylyv V. P. (2011). Karbonatna syrovyna ta palyvo dlia oderzhannia vapna v tsukrovomu vyrobnytstvi [Carbonate raw materials and fuel for lime production in sugar production]. Tsukor Ukrainy [Sugar of Ukraine]. № 9–10. P. 28–36. [in Ukrainian].

6. Shtanheiev K. O (2015) Otrymannia vapna ta saturatsiinoho hazu: Zvit proektu «Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti ta stymuliuvannia vykorystannia vidnovliuvanoi enerhii v ahro-kharchovykh ta inshykh malykh ta serednikh pidpriemstvakh Ukrainy», shcho vykonuietsia Ahenstvom OON z pytan promysloвого rozvytku (IuNIDO) za pidtrymky Hlobalnogo Ekolohichnogo Fondu [Production of lime and saturated gas: Report of the project "Improving energy efficiency and promoting the use of renewable energy in agro-food and other small and medium-sized enterprises of Ukraine", implemented by the United Nations Industrial Development Agency (UNIDO) with the support of the Global Environment Facility]. Kyiv. UNIDO. 61 p. [in Ukrainian].
7. Vyerchenko, L., Tkachenko, S., Sheiko, T., Kos, T., Dzhohan, O., Vasuliv, V. (2019). The Study of Calcium Hydroxide Structure and its Physico-Chemical and Electrokinetic Properties in Sugar Production. *Chemistry & Chemical Technology*. 13. P. 477–481. <https://doi.org/10.23939/chcht13.04.477>
8. Alaghbary, Adeeb (2024). Carbonation Process in Sugar Refinery. ResearchGate <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33538.90564>.
9. Vierchenko L. M., Kos, T. S. (2010) Metodyka rozrakhunku shkidlyvykh vykydiv v atmosferu iz vidpratsovanym saturatsiinym hazom [Methodology for calculating harmful emissions into the atmosphere from waste saturation gas]. *Tsukor Ukrainy [Sugar of Ukraine]*. № 4. P. 42–45. [in Ukrainian].
10. Ponomarenko V. V., Pushanko M. M., Lementar S. Yu., Lyulka D. M. (2014). Ochysnyk saturatsiinoho hazu [Saturation gas purifier]. *Tsukor Ukrainy [Sugar of Ukraine]*. № 12. P. 11–13. [in Ukrainian].
11. Khomichak L. M., Verchenko L. M., Petrychenko I. B., Reznichenko Yu. M. (2016). Tekhnolohichne vapno, saturatsiinyi haz i ekolohiia: suchasni realii: materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Perspektyvy rozvytku tsukrovoi promyslovosti Ukrainy», 31 bereznia – 1 kvitnia 2016 r. [Process Lime, Saturation Gas and Ecology: Modern Realities: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Prospects for the Development of the Sugar Industry of Ukraine", March 31–April 1, 2016.]. Kiev. NUFT. P. 33–35. [in Ukrainian].
12. Khomichak L. M., Verchenko L. M., Petrychenko I. B., Reznichenko Yu. M. (2017) Vzaiemovplyv funktsionuvannia vapniano-hazovoi pechi i stantsii vapnokarbonizatsii na efektyvnist roboty zavodu ta ekolohiiu navkolyshnoho seredovyshcha [Interaction of lime-gas kiln and lime-carbonation plant operation on plant efficiency and environmental impact]. *Tsukor Ukrainy [Sugar of Ukraine]*. № 2. P. 16–18. [in Ukrainian].
13. Vierchenko L.M., Shevtsov L.D. (2017). Vplyv oksydu vuhletsiiu (CO) na protses karbonizatsii ta yakisni pokaznyky sokiv [Influence of carbon monoxide (CO) on the carbonization process and juice quality]. *Tsukrova Haluz/Naukovo-informatsiinyi visnyk [Sugar Industry / Scientific and Information Bulletin]*. № 4. P. 5–10. [in Ukrainian].
14. Vierchenko L.M., Pedos A.H. (2017). Vplyv kysniu karbonizatsiinoho hazu na yakist sokiv tsukrovoho vyrobnytstva [Influence of carbonization gas oxygen on the quality of sugar production juices]. *Tsukrova Haluz/Naukovo-informatsiinyi visnyk [Sugar Industry / Scientific and Information Bulletin]*. № 5. P. 5–9. [in Ukrainian].
15. Lixiao Luo, Wei Zhang, Yu Zhang, Dongdong Feng, Yuzhi Li, Xishan Zhu, Haibo Ye, Weichong Chen, Yingsen Qin (2024). Study on life-cycle carbon emission accounting of cane sugar products based on ammonia-based CO₂ capture method. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Volume 68. 103858. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103858>.
16. Kuo Li, Mingyue Zhao, Yingchun Li, Yutong He, Xue Han, Xin Ma, Fen Ma, Spatiotemporal Trends of the Carbon Footprint of Sugar Production in China. *Sustainable Production and Consumption*. 2024. Volume 46. P. 502–511. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.03.010>.
17. Bahamin Bazooyar, Ali Nabavi, Peter Clough, Edward J. Anthony, Vasilije Manovic, (2024). Towards decarbonisation of sugar refineries by calcium looping: Process integration, energy optimisation and technoeconomic assessment. *Energy Conversion and Management*. Volume 314. 118597. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118597>.
18. Hannah Green, Peter Larsen, Yang Liu, Paul N. Nelson (2024). Carbon dioxide removal via weathering of sugarcane mill ash under different soil conditions. *Applied Geochemistry*. Volume 165. 105940. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.105940>.
19. Folprechtova A., Hanslian L. (1979). A rather rare case of carbon monoxide poisoning in a sugar mill. *Pracovni Lekarstvi*. 31 (4), P. 141–143.

20. Okys vuhletsiu (chadnyi haz) [Carbon monoxide]. [Elektronni resurs]. (date of access 13.08.2024). <https://empendium.com/ua/chapter/B27.II.20.10>.
21. Opara N. M., Dudar N. I. (2013). Chadnyi haz: vplyv na orhanizm liudyny, sposoby individualnoho zakhystu i bezpechnoi povedinky. Aspekty bezpeky pratsi, zhyttia ta dovkillia liudyny : tezy dopovidei VI rehionalnoi mizhvuzivskoi naukovo-praktychnoi konferentsii 28 bereznia 2013 r. [Carbon monoxide: impact on the human body, methods of personal protection and safe behavior. Aspects of safety of human labor, life and environment: abstracts of the VI regional inter-university scientific and practical conference on March 28, 2013.]. Poltava. PDAA. P. 42–45. [in Ukrainian].
22. Dioksyd vuhletsiu [Carbon dioxide]. [Elektronni resurs]. (date of access 13.08.2024). https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D1%96%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B4_%D0%B2%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B5%D1%86%D1%8E.
23. Yak CO₂ vplyvaie liudynu pry nadlyshku v prymishchenni? [How does CO₂ affect humans when there is an excess in the room?]. [Elektronni resurs]. (date of access 13.08.2024). <https://ventbazar.ua/uk/blog/chto-takoye-co2>.
24. De Figueiredo, E. B., Panosso, A. R., Romão, R. et al. (2010). Greenhouse gas emission associated with sugar production in southern Brazil. Carbon Balance Manage. 5(1):3. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-5-3>.
25. Vyhovskyi V. Yu., Khomichak L. M., Petrychenko I. B., Kalinichenko O. M., Bielostotskyi L. H. (2002). Pidvyshchennia efektyvnosti roboty saturatoriv tsukroburiakovoho vyrobnytstva [Improving the efficiency of sugar beet production saturators]. Tsukor Ukrainy [Sugar of Ukraine]. № 2. P. 1–9. [in Ukrainian].
26. Zakon Ukrainy pro zasady monitorynhu, zvitnosti ta veryfikatsii vykydiv parnykovykh haziv [The Law of Ukraine on the Principles of Monitoring, Reporting and Verification of Greenhouse Gas Emissions]. [Elektronni resurs]. (date of access 13.08.2024). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/377-20>.
27. Nakaz Minpryrody vid 22.10.2008 №541 «Pro zatverdzhennia tekhnolohichnykh normatyviv dopustymoho vykydu zabrudniuiuchykh rehovyn iz teplosylovykh ustanovok, nominalna teplova potuzhnist yakykh perevyshchuie 50 MVt» [Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine No. 541 dated 22.10.2008 "On Approval of Technological Standards for Permissible Emissions of Pollutants from Thermal Power Plants with a Nominal Thermal Capacity of More than 50 MW"]. [Elektronni resurs]. (date of access 13.08.2024). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1110-08#Text>.
28. Nakaz Ministerstva okhorony navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha Ukrainy vid 17.09.2010 № 407 “Metodychnykh rekomendatsii shchodo oformlennia dozvolu na vykydy zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosferne povitria statsionarnymy dzherelamy dlia subiektiv hospodariuvannia z urakhuvannia tekhnolohichnykh normatyviv dopustymykh vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosferne povitria” [Order of the Ministry of Environmental Protection of Ukraine dated 17.09.2010 No. 407 "Methodological Recommendations on Issuance of Permits for Air Pollutant Emissions by Stationary Sources for Business Entities Taking into Account Technological Standards for Permissible Air Pollutant Emissions"]. [Elektronni resurs]. (date of access 13.08.2024). <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0407617-10#Text>.
29. Nakaz Ministerstva Ekolohii ta Pryrodnykh Resursiv Ukrainy vid 01.07.2015 №260 «Pro zatverdzhennia Tekhnolohichnykh normatyviv dopustymykh vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn iz ustatkuvannia (ustanovky) dlia vyrobnytstva vapna v obertovykh vypaliuvalnykh pechakh, vyrobnycha potuzhnist yakykh perevyshchuie 50 tonn na den, abo v inshykh pechakh, vyrobnycha potuzhnist yakykh perevyshchuie 50 tonn na den» [Order of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine dated 01.07.2015 No. 260 "On Approval of Technological Standards for Permissible Emissions of Pollutants from Equipment (Plant) for Lime Production in Rotary Kilns with Production Capacity exceeding 50 tons per day or in Other Kilns with Production Capacity exceeding 50 tons per day"]. [Elektronni resurs]. (date of access 13.08.2024). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0878-15#Text>.
30. Vierchenko L. M., Kos, T. S. (2010). Metodyka rozrakhunku kilkosti pichnoho hazu, yakyi vykhodyt iz vapnianoï pechi ta podaetsia na saturatsiiu [Methodology for calculating the amount of furnace gas leaving the lime kiln and supplied for saturation]. Kharchova promyslovist [Food industry]. № 9. P. 5–7. [in Ukrainian].
31. Nakaz Ministerstva enerhetyky ta zakhystu dovkillia Ukrainy vid 28.04.2020 roku № 277) “Pro zatverdzhennia Metodyky rozrakhunku rozmiriv vidshkoduvannia zbytkiv, yaki zapodiiani derzhavi v rezultati nadnormatyvnykh vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosferne povitria” [Order of the Ministry of Energy and Environmental Protection of Ukraine dated 28.04.2020 No. 277) "On Approval of the Methodology for Calculating the Amount of Compensation for Damages Caused to the State as a Result of

Excessive Emissions of Pollutants into the Atmospheric Air"]. [Elektronni resurs]. (date of access 13.08.2024). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0414-20#Text>.

32. Podatkovyi kodeks Ukrainy [Tax Code of Ukraine]. [Elektronni resurs]. (date of access 13.08.2024). https://ips.ligazakon.net/document/t10_2755?an=23866.

33. Chy vplyne zbilshennia podatku na SO₂ na ekolohichni stan v kraini? [Will the increase in the CO₂ tax affect the environmental situation in the country?]. [Elektronni resurs]. (date of access 13.08.2024). <https://razumkov.org.ua/statti/chy-vplyne-zbilshennia-podatku-na-so2-na-ekologichniy-stand-v-kraini>.

34. Divya Baskaran, Panchamoorthy Saravanan, L. Nagarajan, Hun-Soo Byun (2024) An overview of technologies for capturing, storing, and utilizing carbon dioxide: Technology readiness, large-scale demonstration, and cost. Chemical Engineering Journal. Volume 491. 151998, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151998>.

35. Danilova, K. O. (2023) Doslidzhennia protsesu karbonizatsii vapnovanoho dyfuziinoho soku v tsukrovomu vyrobnytstvi [Study of carbonization process of limed diffusion juice in sugar production]. Prodovolchi resursy [Food resources]. 11 (21). P. 73–83. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-07> [in Ukrainian].

36. Khomichak L. M., Kuznietsova I. V., Zaichuk M. V., Dzhohan O. I., Zaichuk L. P. & Bondar M. V. Doslidzhennia termichno modyfikovanoho defekatu ta yoho zastosuvannia dlia ochyshchennia transporterno-myinoi vody [Investigation of thermally modified defecate and its application for cleaning of conveyor and washing water]. Prodovolchi resursy [Food resources]. 11 (21). P. 159–166. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-16> [in Ukrainian].

37. Khomichak, L. M. (2003). Naukove obhruntuvannia ta rozroblennia sposobiv ochyshchennia dyfuziinoho soku: dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.18.05 «Tekhnolohiia tsukrystykh rehovyn» [Scientific substantiation and development of methods for purification of diffusion juice: dissertation. ... Dr. Sci: 05.18.05 "Technology of sugary substances"] / Khomichak Liubomyr Mykhailovych. Kyiv. NUFT. 447 p. [in Ukrainian].

38. Khomichak L. M., Petrychenko I. B., Vyhovskiy V. Yu. (2001). Provedennia pershoi saturatsii v aparati z vnutrishnimy sektsiinymy tsyrkuliatsiinymy konturamy [Conducting the first saturation in a device with internal sectional circulation circuits]. Kharchova promyslovist [Food industry]. № 1. P. 57–59. [in Ukrainian].

39. Vyhovskiy V. Yu., Khomichak L. M., Petrychenko I. B., Kalinichenko O. M., Miroshnyk V. O., Skoryk K. D. (2011). Vplyv konstruktsiinnykh elementiv saturatora na kratnist tsyrkuliatsii [Influence of structural elements of the saturator on the circulation rate]. Tsukor Ukrainy [Sugar of Ukraine]. № 4. P. 38–42. [in Ukrainian].

40. Sugumar Mohanasundaram, Venkatramanan Varadharajan, Mayakannan Selvaraju, Sivasubramanian Manikandan, Subbaiya Ramasamy, Mani Jayakumar, Venkatesa Prabhu Sundramurthy, Gurunathan Baskar, Arivalagan Pugazhendhi (2024). Green ammonia as peerless entity for realm of clean-energy carrier toward zero carbon emission: Purviews, neoteric tendencies, potentialities and downsides. Fuel. Volume 365. 131118. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131118>.