

УДК 620.92

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.31.875

ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВИРОБНИЦТВ БІОЕТАНОЛУ В УКРАЇНІ

ГАРМАШ С. М.^{1*}, канд. с.-г. наук, доц.,
ГЕРАСИМЕНКО В. О.², канд. хім. наук, доц.,
СМИРНОВА О. В.³, канд. техн. наук, доц.,
СУБОТІНА М. Ю.⁴, студ.

^{1*} Кафедра охорони праці та безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 538-71-38, e-mail: svgarmash@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2658-162X

² Кафедра охорони праці та безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (099) 250-58-65, e-mail: gerasim_vlad@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-3369-4267

³ Кафедра охорони праці та безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел.+38 (063) 347-85-91, e-mail: email.smirnova@gmail.com; ORCID ID: 0000-0001-9819-7769

⁴ Кафедра охорони праці та безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Гагаріна, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 538-68-51, e-mail: msubbotina18@gmail.com

Анотація. Постановка проблеми. Скорочення викидів парникових газів – основна проблема сучасності. Ефективним способом вирішення цього питання стала заміна певної частки бензину на біоетанол, який отримується на основі бродіння цукро- і крохмалевмісної сировини. Завдяки сировинній базі складаються всі передумови для отримання біоетанолу в Україні. Для підприємств виробництва біоетанолу особливо актуальна проблема безпеки навколишнього середовища. **Мета статті** – на основі аналітичного огляду існуючих методів дослідження екологічної безпеки процесів отримання біоетанолу у світі розробити рекомендації для оцінювання екологічної безпеки біоетанолових виробництв в Україні. **Висновки.** У процесі виробництва біоетанолу утворюються побічні продукти, які можуть спричинити шкоду довкіллю (вуглекислий газ, сивушні масла, метанол, фурфурол, лігнін та ін.). Для запобігання забрудненню території підприємства, навколишнього середовища на стадії проектування (побудови) повинна передбачатися утилізація (нейтралізація) в очисних спорудах (установках) побічних продуктів та відходів виробництва біоетанолу. Для аналізу екологічної безпеки складаються спрощені технологічні схеми процесів виробництва біоетанолу з урахуванням основного обладнання та технологічних потоків. Для оцінювання небезпеки виробництва біоетанолу доцільно застосувати методи внутрішнього індексу безпеки (ISI) та метод навколишнього середовища, здоров'я та безпеки (EHS), в яких враховуються основні параметри на кожній стадії виробництва: масовий потік речовини, температура, тиск, тип (схема) обладнання, тип технологічного процесу; реакція небезпеки (ентальпія виділення); хімічна взаємодія з компонентами довкілля; токсичність, реакція розкладання; корозійна здатність; умови пожежовибухонебезпечності та ін. У технологічному регламенті підприємства в розділі «Охорона навколишнього середовища» рекомендовано подати спрощену модель впливу температури виділення біоетанолу і тиску його пари на швидкість випаровування, що допоможе забезпечити надійні прогнози наслідків надзвичайних ситуацій (на основі рівняння Маккея та Мацугу). Наведені методи дозволять підвищити достовірність оцінки екологічної безпеки виробництв біоетанолу.

Ключові слова: екологічна безпека; виробництво біоетанолу; світовий досвід; оцінка екобезпеки; рекомендації виробництву

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL SAFETY FOR BIOETHANOL PRODUCTION IN UKRAINE

GARMASH S.N.^{1*}, Cand. Sc. (Agr.), Assoc. Prof.,
GERASIMENKO V.A.³, Cand. Sc. (Chem.), Assoc. Prof.,
SMIRNOVA O.V.³, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
SUBOTINA M.Yu.⁴, Stud.

^{1*} Department of Labour Protection and Life Safety, State Higher Educational Institution “Ukrainian State University of Chemical Technology”, 8, Haharina Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 538-71-38, e-mail: svgarmash@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2658-162X

² Department of Labour Protection and Life Safety, State Higher Educational Institution “Ukrainian State University of Chemical Technology”, 8, Haharina Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (099) 250-58-65, e-mail: gerasim_vlad@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-3369-4267

³ Department of Labour Protection and Life Safety, State Higher Educational Institution “Ukrainian State University of Chemical Technology”, 8, Haharina Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (063) 347-85-91, e-mail: email.smirnova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9819-7769

⁴ Department of Labour Protection and Life Safety, State Higher Educational Institution “Ukrainian State University of Chemical Technology”, 8, Haharina Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (066) 538-68-51, e-mail: msubbotina18@gmail.com

Abstract. Problem statement. These days reduction of greenhouse gas emissions is the main problem. An effective way to solve this issue is to replace a certain proportion of gasoline with bioethanol, which is obtained on the basis of sugar fermentation - and starch-containing raw materials. Due to the raw material base, all prerequisites for obtaining bioethanol in Ukraine are met. The issue of environmental safety is especially relevant for bioethanol production enterprises. **The purpose of the article** is to develop recommendations for assessing the environmental safety of bioethanol production in Ukraine based on an analytical review of existing methods for researching the environmental safety of bioethanol production processes in the world. **Conclusions.** In the process of bioethanol production, by-products are formed that can cause damage to the environment (carbon dioxide, safflower oil, methanol, furfural, lignin, and others). In order to prevent pollution of the enterprise's territory and the environment at the design (construction) stage, disposal (neutralization) of by-products and waste from bioethanol production should be provided in treatment facilities (installations). For the analysis of environmental safety, simplified technological schemes of bioethanol production processes are drawn up, taking into account the main equipment and technological flows. To assess the danger of bioethanol production, it is advisable to apply the methods of the internal safety index (ISI) and the method of environment, health and safety (EHS), which take into account the main parameters at each stage of production: mass flow of substance, temperature, pressure, type (diagram) equipment, type of technological process; danger reaction (enthalpy of release); chemical interaction with environmental components; toxicity, decomposition reaction; corrosive ability; fire and explosion hazard conditions, etc. In the technological regulations of the enterprise, (the «Environmental protection» section), it is recommended to present a simplified model for the influence of the bioethanol release temperature and its vapor pressure on the evaporation rate, which helps to ensure reliable forecasts of the emergency situations consequences (based on the equation of Mackay and Matsugu). The presented methods will increase the assessment reliability of the environmental safety for bioethanol production.

Keywords: *environmental safety; production of bioethanol; world experience; assessment of eco-safety; production recommendations*

Постановка проблеми. Скорочення викидів парникових газів – основна проблема сучасності. Ефективним способом вирішення цього питання стала заміна певної частки бензину на біоетанол, що менше забруднює навколишнє середовище. Відповідно до законопроекту Верховної Ради України з липня 2021 року бензин, вироблений у країні, повинен на 5 % складатися з біоетанолу з подальшим його збільшенням до 6 % у 2022 р. та до 7 % у 2023 році. Завдяки сировинній базі складаються всі передумови для отримання біоетанолу в Україні [1]. Для підприємств виробництва біоетанолу особливо актуальна проблема безпеки навколишнього середовища.

Аналіз публікацій. Країни Європейського союзу, США та Бразилія вже давно активно розвивають ринок рідкого біопалива біоетанолу з рослинної сировини

– цукрового буряку чи тростини, пшениці, кукурудзи та ін. Етиловий спирт отримується на основі бродіння цукро- і крохмалевмісної сировини, а саме: зерна, картоплі, сорго, відходів харчової промисловості (меласа, сироп тощо) [2]. Альтернативне джерело енергії не стало абсолютно безпечним для навколишнього середовища – енергія, використовувана для вирощування, переробки та транспортування сільськогосподарських культур, також являє собою джерело викидів CO₂.

Україна має дефіцит власних енергоносіїв і може забезпечити свої потреби за рахунок власних енергоносіїв лише на 50 %, у нафті – на 10...12 %, у природному газі – до 30 %. Використання біопалива має низку переваг: поновлювані ресурси, екологічна нейтральність та низька собівартість.

В останні роки випуск біоетанолу у світі перевищив 85 млрд літрів. США і Бразилія – ці два найбільші виробники даного виду біопалива забезпечують близько 90 % сукупного виробництва, а решта припадає на Китай, Канаду, ЄС (в основному Францію і Німеччину) та Індію. Загалом енергетичний потенціал біопалива в Україні оцінюють у 27 млн т умовного палива на рік [6].

До 2030 року залежно від географічного розташування країн біопаливо може зайняти від 10 до 30 % сукупного енергетичного споживання. Виробництва розташовані переважно на базі цукрових підприємств. Біоетанол використовують як паливо для автомобілів, його застосовують у суміші з бензином для підвищення октанового числа і зменшення токсичності відпрацьованих газів. Суміш, котра містить не більше 10 % етилового спирту, називають Е10. Є суміші, в яких вміст етилового спирту становить 85 % (Е85) [4; 5].

Вплив на навколишнє середовище, головним чином виражений у вигляді викидів парникових газів, оцінюється для виробництва біоетанолу з різних видів сировини, включаючи, наприклад, кукурудзу в США [17], цукрову тростину в Бразилії [16], кукурудзяне зерно [15].

Під час проектування виробництв за новими технологіями необхідно основну увагу звернути на безпеку процесу як на найважливішу проблему, тобто технології повинні бути з високим ризиком безпеки та мати незначний вплив на навколишнє середовище [9–10]. Аспекти безпеки виробничих процесів повинні бути ретельно перевірені перед широкомасштабним упровадженням. Різні види біомаси, що використовуються для виробництва біоетанолу, вимагають різних технологій попередньої обробки та ферментації, що зумовлює різноманітні стадії процесу та умови експлуатації, які можуть безпосередньо впливати на показники безпеки [7; 13].

Аналіз екологічної безпеки процесів виробництва біоетанолу рекомендовано проводити шляхом застосування систематичних методів оцінювання безпеки

навколишнього середовища та здоров'я [8; 18]. Матеріальний та тепловий баланс отримання біоетанолу з цукрової тростини, кукурудзи та кукурудзяного зерна враховані для двох методів оцінювання небезпеки: метод внутрішнього індексу безпеки (ISI) і метод навколишнього середовища, здоров'я та безпеки (EHS) [7]. Ці методи також нещодавно були інтегровані в модернізацію процесу [8] і концептуальний дизайн [18].

На основі цих різних методів оцінювання небезпек можна всебічно виявити фактори ризику технологій виробництва біоетанолу. Ці показники орієнтовані на небезпеку, їх можна поєднувати з іншими показниками дизайну для поліпшення багатокритеріального прийняття рішень та оцінити екологічне навантаження [11; 19].

Досвід підприємств країн світу з виробництва біопалива свідчить про необхідність удосконалення методів визначення факторів ризику процесів отримання біоетанолу та оцінювання екологічної безпеки підприємств.

Мета роботи – на основі аналітичного огляду існуючих методів дослідження екологічної безпеки процесів отримання біоетанолу у світі розробити рекомендації для оцінювання екологічної безпеки біоетанолових виробництв в Україні.

Результати досліджень. Виробництво біоетанолу в Україні здійснюється переважно на реконструйованих спиртових заводах. Використання рідкого біопалива дасть змогу зменшити викиди в атмосферу парникових газів і буде мати позитивний вплив на скорочення імпорту нафтопродуктів. Біоетанол за ступенем впливу на організм людини належить до 4-го класу небезпеки. Гранично допустима концентрація (ГДК) парів біоетанолу в повітрі робочої зони виробничих приміщень по етиловому спирту – 1 000 мг/м³. Гранично допустима концентрація біоетанолу в атмосферному повітрі населених місць – 5 мг/м³. Біоетанол має наркотичну дію та здатен проникати через пошкоджену шкіру [4].

У процесі виробництва біоетанолу утворюється ряд побічних продуктів, що

можуть спричинити шкоду навколишньому середовищу: вуглекислий газ, сивушні масла, метанол, фурфурол, лігнін та ін.

Для запобігання виходу вуглекислого газу пропонують його уловлювати в циклонах і переробляти на вуглекислоту. В процесі ректифікації утворюється багато побічних продуктів із бражної колони, після ректифікації виходить барда, скидання якої у водойми та каналізацію може спричинити мікробіологічне забруднення (через уміст пентозів – поживних речовин для мікроорганізмів). Барду потрібно очищати на промислових очисних спорудах або використовувати для отримання кормових дріжджів [6].

У процесі виробництва біоетанолу необхідне виконання всіх вимог, норм і правил, як і на виробництвах етилового спирту з рослинної сировини: вимоги щодо викидів в атмосферу, очищення стічних вод, утилізації побічних продуктів і відходів виробництва. Повинен бути постійний контроль за вмістом гранично допустимих викидів із метою охорони атмосферного повітря від забруднення викидами шкідливих речовин.

Технологія одержання біоетанолу складається з кількох етапів, коли необхідно виконати вимоги охорони праці та екологічної безпеки: підготовка та подрібнення сировини, що містить цукор або крохмаль (зерна жита або пшениці, відходи кукурудзи, картоплі, цукрового буряка та ін.); ферментація – розщеплення крохмалю до спирту за дії дріжджових ферментів із застосуванням препаратів альфа-амілази; ректифікація браги – розділення, засноване на різних температурах кипіння компонентів, що здійснюється у колонних апаратах з контактними елементами у вигляді тарілок.

Для оцінення екологічної безпеки складаються спрощені технологічні схеми процесів виробництва біоетанолу з урахуванням основного обладнання та технологічних потоків. Наприклад, до основних технологічних процесів належать: попередня обробка сировини, зрідження, паровий вибух та кислотний гідроліз, ферментація, перетворення основного

компонента на глюкозу, концентрування (центрифугування), ректифікація та ін.

Для оцінення безпеки виробництва біоетанолу перспективні методи внутрішнього індексу безпеки (ISI) та метод навколишнього середовища, здоров'я та безпеки (EHS), які були широко застосовані для хімічних виробництв [7]. Метод ISI складається з двох основних груп показників: ISI (ICI) і ISI (IPI). ICI включає індекси теплоти основної реакції, теплоти потенційної побічної реакції, займистості, вибуховості, токсичності, корозійної активності та несумісності хімічних речовин.

IPI включає індекси хімічних речовин, температури та тиску процесу, тип обладнання та стадії процесу. Кожен індекс отримує оцінку за дискретною шкалою з нижньою та верхньою межами, вищі значення вказують на більш небезпечну хімічну речовину [13].

У методі EHS [7] визначено набір небезпечних властивостей (рухливість, пожежа/вибух, реакція/розкладання, токсичність, подразнення, тверді відходи, деградація та накопичення). Шкала кількісно визначає небезпечні властивості речовин, що беруть участь у процесі (індексів зі значеннями від 0 до 1).

Оцінка процесів виробництва біоетанолу за допомогою методу ISI показала, що стадія бродіння найнебезпечніша, що пов'язано з виділенням тепла в результаті екзотермічних реакцій під час бродіння (наприклад, побічна реакція утворення оцтової кислоти з глюкози) і реакційної здатності побічних продуктів (наприклад, оцтової, молочної та янтарної кислоти).

Попередня обробка вихідної сировини в процесі виробництва цукрової тростини отримує найнижчу оцінку ISI головним чином тому, що вона виконується за нижчої температури порівняно з процесами виробництва кукурудзи.

Оцінка процесів виробництва біоетанолу за допомогою методу EHS показала, що бродіння класифікується як найменш небезпечна стадія, за якою йде попередня обробка. Метод EHS враховує наявність

вуглекислого газу під час продувки абсорбера.

Для прогнозування поширення парів унаслідок розгерметизації обладнання Маккей та Мацугу (США) розробили спрощену модель впливу температури виділення біоетанолу і тиску його пари на швидкість випаровування, яка здатна забезпечити надійні прогнози наслідків надзвичайних ситуацій [14]. Біоетанол має високу температуру кипіння (78°C), і випаровування його з резервуарів головним чином залежить від швидкості повітря. Перенесення маси визначається результуючим градієнтом концентрації. Рушійною силою є різниця між тиском пари рідини та парціальним тиском рідини в атмосфері.

Швидкість випаровування, яка розрахована за рівняннями (1), максимальна в ізотермічних умовах, і тому дійсна на початку випаровування:

$$v = k \cdot M \cdot P_{\text{атм}} \cdot RT \cdot \ln(1 + P_v - P_{\text{птба}} \cdot P_{\text{атм}} - P_v), \quad (1)$$

де $P_{\text{атм}}$ – атмосферний тиск (101 325 Па); $P_{\text{птба}}$ – парціальний тиск біопалива в атмосфері; P_v – тиск пари біоетанолу за його температури (Па).

На основі рівняння Маккея та Мацугу, яке враховує радіус резервуара та швидкість повітря, можливо визначити поправку (k_1) коефіцієнта масопереносу:

$$k_1 = 0.005 \cdot v_{10}^{0.78} \cdot (2r_0)^{-0.11} \cdot Sc^{-0.67}, \quad (2)$$

де r_0 – радіус резервуара з біоетанолом (м); v_{10} – швидкість вітру на висоті 10 м (м/с); Sc – число Шмідта (0,8 для парів).

Таким чином, на підприємствах із виробництва біоетанолу можливо розрахувати швидкість випаровування біоетанолу при визначенні поправки (k_1) коефіцієнта масопереносу та прогнозувати небезпечні зони на підприємстві.

Для оцінення пожежної небезпеки технологічного процесу виробництва біоетанолу раніше автори статті представили методику визначення: надлишкового тиску, що розвивається під час згоряння пароповітряних сумішей біоетанолу; розміру зон, обмежених нижньою концентраційною межею поширення полум'я (НКМП) парів [2].

Для загальної оцінки небезпеки виробництва біоетанолу доцільно застосувати методи внутрішнього індексу безпеки (ISI) та метод навколишнього середовища, здоров'я та безпеки (EHS), у яких враховуються основні параметри на кожній стадії виробництва: масовий потік речовини, температура, тиск, тип/схема обладнання, тип технологічного процесу; реакція небезпеки (ентальпія виділення); хімічна взаємодія з компонентами довкілля; токсичність, реакція розкладання; корозійна здатність; умови пожежовибухонебезпечності. В технологічному регламенті підприємства (або екологічному паспорті підприємства) [3] в розділі «Охорона навколишнього середовища» доцільно навести спрощену модель впливу температури виділення біоетанолу і тиску його пари на швидкість випаровування, яка здатна забезпечити надійні прогнози наслідків надзвичайних ситуацій (на основі рівняння Маккея та Мацугу).

Висновки.

1. У процесі виробництва біоетанолу утворюється побічні продукти, які можуть спричинити шкоду довкіллю (вуглекислий газ, сивушні масла, метанол, фурфурол, лігнін та ін.).

2. Для аналізу екологічної безпеки рекомендовано складати спрощені технологічні схеми процесів виробництва біоетанолу з урахуванням основного обладнання та технологічних потоків.

3. Для оцінення небезпеки виробництва біоетанолу доцільно застосувати методи внутрішнього індексу безпеки (ISI) та метод навколишнього середовища, здоров'я та безпеки (EHS), у яких враховуються основні параметри на кожній стадії виробництва: масовий потік речовини, температура, тиск, тип (схема) обладнання, тип технологічного процесу; реакція небезпеки (ентальпія виділення); хімічна взаємодія з компонентами довкілля; токсичність, реакція розкладання; корозійна здатність; умови пожежовибухонебезпечності та ін.

4. У технологічному регламенті підприємства (розділ «Охорона навколишнього середовища») рекомендовано надати спрощену модель

впливу температури виділення біоетанолу і надійні прогнози наслідків надзвичайних тиску його пари на швидкість ситуацій. випаровування, що дозволяє забезпечити

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Биоэтанол в бензине с 2021 года. URL: <https://ubr.ua/market/industrial/bioetanol-v-benzine-s-2021-hoda-vyrastut-li-tseny-i-pochemu-neftepererabatyvajushchie-kompanii-protiv-3892881> (дата звернення: 27.06.2022).
2. Гармаш С. М., Чернова А. С. Визначення основних критеріїв за вибухопожежною та пожежною небезпекою у виробництвах біопалива. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 4 (267–268). С. 25–31.
3. ГОСТ 17.0.0.04-90. Система стандартів у області охорони природи і поліпшення використання природних ресурсів. Екологічний паспорт промислового підприємства. Основні положення.
4. ГОСТ 33872-2016. Межгосударственный стандарт. Биоэтанол топливный денатурированный. Технические условия. Москва : Стандартинформ, 2017. 11 с.
5. ДСТУ 7687:2015. Бензини автомобільні Євро. Технічні умови. [Чинний від 2015-05-28]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 16 с.
6. Марченко В. М., Кіт А. В. Аналіз потенціалу виробництва біоетанолу з цукрових буряків в Україні. *Агроекономіка*. 2018. № 22. С. 21–27.
7. Alireza Banimostafa, Thuy Thi Hong Nguyen, Yasunori Kikuchi, Stavros Papadokonstantakis, Hirokazu Sugiyama, Masahiko Hirao and Konrad Hungerbühler. Safety, health, and environmental assessment of bioethanol production from sugarcane, corn, and corn stover. *Green Processing and Synthesis*. 2012. Vol. 1, iss. 5. Pp. 449–461.
8. Carvalho A., Gani R., Matos H. Design of sustainable chemical processes : Systematic retrofit analysis generation and evaluation of alternatives. *Process Safety and Environmental Protection*. 2008. Vol. 86. Pp. 328–346.
9. Fukushima Y., Kikuchi Y., Kajikawa Y., Kubota M., Nakagaki T., Matsukata M., Kato Y., Koyama M. J. Tackling power outages in Japan : The earthquake compels a swift transformation of the power supply. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 2011. Vol. 44. Pp. 365–369.
10. Jiménez-González C., Constable D. J. C and oth. Green Chemistry and Engineering : a Practical Design Approach. *John Wiley & Sons*. New Jersey, 2011. 696 p.
11. Huijbregts M. A. J., Hellweg S., Frischknecht R., Hendriks H. W. M., Hungerbühler K., Hendriks A. J. Cumulative energy demand as predictor for the environmental burden of commodity production. *Environmental Science & Technology*. 2010. Vol. 44. Pp. 2189–2196.
12. Lauri Roberto, Biancamaria Pietrangeli Biorefinery. Safety : a Case Study Focused on Bioethanol Production. Submitted : April 10th 2019. Reviewed : June 12th 2019. Published : July 23rd 2019.
13. Li X., Zanwar A., Jayswal A., Lou H. H., Huang Y. Incorporating exergy analysis and inherent safety analysis for sustainability assessment of biofuels. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011. Vol. 50. Pp. 2981–2993.
14. Liska A. J., Yang H. S., Bremer V. R., Klopfenstein T. J., Walters D. T., Erickson G. E., Cassman K. G. Improvements in Life Cycle Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emissions of Corn-Ethanol. *Journal of Industrial Ecology*. 2009. Vol. 13. Pp. 58–74.
15. Luo L., Van der Voet E., Huppel G. An energy analysis of ethanol from cellulosic feedstock – Corn stover. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 13, iss. 8. Pp. 2003–2011.
16. Macedo I. C., Seabra J. E. A., Silva J. E. A. R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil : the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*. 2008. Vol. 32. Pp. 582–595.
17. Plevin R. J. J. Modeling corn ethanol and climate: a critical comparison of the BESS and GREET models. *Journal of Industrial Ecology*. 2009. Vol. 13. Pp. 495–507.
18. Sugiyama H., Fischer U., Hungerbühler K., Hirao M. Decision framework for chemical process design including different stages of environmental, health, and safety assessment. *Access Chemical Engineering Research*. 2008. Vol. 54. Pp. 1037–1053.
19. Wernet G., Mutel C., Hellweg S., Hungerbühler K. The Environmental Importance of Energy Use in Chemical Production. *Journal of Industrial Ecology*. 2011. Vol. 15, iss. 1. Pp. 96–107.

REFERENCES

1. *Bioetanol v benzine s 2021 goda* [Bioethanol in gasoline since 2021]. URL: <https://ubr.ua/market/industrial/bioetanol-v-benzine-s-2021-hoda-vyrastut-li-tseny-i-pochemu-neftepererabatyvajushchie-kompanii-protiv-3892881> (date of application: 27.06.2022). (in Russian).
2. Garmash S.M. and Chernova A.S. *Viznachennya osnovnih kriteriyiv za vibuhopozhezhnoyu ta pozhezhnoyu nebezpekoyu u virobnictvah biopaliva* [Definition of main criteria for explosive fire and fire hazards of biofuel production]. *Visnik Pridniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnictva ta arhitekturi* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020, no. 4 (267–268), pp. 25–31. (in Ukrainian).

3. GOST 17.0.0.04-90. *Sistema standartiv u oblasti ohoroni prirodi i polipshennya vikoristovuvannya prirodni resursiv. Ekologichnij pasport promislivogo pidpriemstva. Osnovni polozhennya* [A system of standards in the field of nature protection and improvement of the use of natural resources. Ecological passport of an industrial enterprise. Substantive provisions]. (in Ukrainian).
4. GOST 33872-2016. *Mezhgosudarstvennyj standart bioetanol toplivnyj denaturirovannyj. Tekhnicheskie usloviya*. [Interstate standard bioethanol fuel denatured. Technical conditions]. Moscow : Standartinform Publ., 2017, 11 p. (in Russian).
5. DSTU 7687:2015. *Benzini avtomobil'ni Evro. Tekhnichni umovi* [Gasoline Automotive Euro. Technological mind]. Kyiv : SE "UkrNDNC" Publ., 2015, 16 p. (in Ukrainian).
6. Marchenko V.M. and Kit A.V. *Analiz potencialu virobnictva bioetanolu z cukrovih buryakiv v Ukraini* [Analysis of the potential of bioethanol production from sugar beets in Ukraine]. *Agrosvit* [Agrarian World]. Kyiv, 2018, no. 22, pp. 21–27. (in Ukrainian).
7. Banimostafa Alireza, Thuy Thi Hong Nguyen, Yasunori Kikuchi, Stavros Papadokonstantakis, Hirokazu Sugiyama, Masahiko Hirao and Konrad Hungerbühler. Safety, health, and environmental assessment of bioethanol production from sugarcane, corn, and corn stover. *Green Processing and Synthesis*. 2012, vol. 1, iss. 5, pp. 449–461.
8. Carvalho A., Gani R. and Matos H. Design of sustainable chemical processes : Systematic retrofit analysis generation and evaluation of alternatives. *Process Safety and Environmental Protection*. 2008, vol. 86, pp. 328–346.
9. Fukushima Y., Kikuchi Y., Kajikawa Y., Kubota M., Nakagaki T., Matsukata M., Kato Y. and Koyama M.J. Tackling power outages in Japan : The earthquake compels a swift transformation of the power supply. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 2011, vol. 44, pp. 365–369.
10. Jiménez-González C., Constable D.J.C and oth. *Green Chemistry and Engineering : a Practical Design Approach*. John Wiley & Sons. New Jersey, 2011, 696 p.
11. Huijbregts M.A.J., Hellweg S., Frischknecht R., Hendriks H.W.M., Hungerbühler K. and Hendriks A.J. Cumulative energy demand as predictor for the environmental burden of commodity production. *Environmental Science & Technology*. 2010, vol. 44, pp. 2189–2196.
12. Lauri Roberto and Biancamaria Pietrangeli *Biorefinery Safety : a Case Study Focused on Bioethanol Production*. Submitted : April 10th 2019. Reviewed : June 12th 2019. Published : July 23rd 2019.
13. Li X., Zanwar A., Jayswal A., Lou H.H. and Huang Y. Incorporating exergy analysis and inherent safety analysis for sustainability assessment of biofuels. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011, vol. 50, pp. 2981–2993.
14. Liska A.J., Yang H.S., Bremer V.R., Klopfenstein T.J., Walters D.T., Erickson G.E. and Cassman K.G. Improvements in Life Cycle Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emissions of Corn-Ethanol. *Journal of Industrial Ecology*. 2009, vol. 13, pp. 58–74.
15. Luo L., Van der Voet E. and Huppes G. An energy analysis of ethanol from cellulosic feedstock – Corn stover. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012, vol. 13, iss. 8, pp. 2003–2011.
16. Macedo I.C., Seabra J.E.A., Silva J.E.A.R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil : the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*. 2008, vol. 32, pp. 582–595.
17. Plevin R.J.J. Modeling corn ethanol and climate: a critical comparison of the BESS and GREET models. *Journal of Industrial Ecology* 2009. Vol. 13, pp. 495–507.
18. Sugiyama H., Fischer U., Hungerbühler K. and Hirao M. Decision framework for chemical process design including different stages of environmental, health, and safety assessment. *Access Chemical Engineering Research*. 2008, vol. 54, pp. 1037–1053.
19. Wernet G., Mutel C., Hellweg S. and Hungerbühler K. The Environmental Importance of Energy Use in Chemical Production. *Journal of Industrial Ecology*. 2011, vol. 15, iss. 1, pp. 96–107.

Надійшла до редакції: 22.07.2022.