

УДК 629.3.063.2

## ОБҐРУНТУВАННЯ ВПЛИВУ ВИСОТИ КАМЕРИ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ ПОВІТРЯ НА ВИХІД ТА ЯКІСТЬ ДЕРЕВНОГО ГАЗУ

Я.Д. Ярош<sup>1</sup>, кандидат технічних наук, Г.А. Голуб<sup>2</sup>, доктор технічних наук, С.М. Кухарець<sup>1</sup>, доктор технічних наук, Н.М. Цивенкова<sup>1</sup>, кандидат технічних наук, В.В. Чуба<sup>2</sup>, кандидат технічних наук, Р.Л. Швець<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Житомирський національний агроекологічний університет

10008 м. Житомир, Старий бульвар, 7

<sup>2</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України

03041 м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15

*Представлено дослідження впливу техніко-експлуатаційних параметрів газогенератора, а саме, висоти камери відновлення та подачі повітря, на вихід деревного газу та концентрацію CO в ньому. Експериментально визначено оптимальні розміри камери відновлення при різних значеннях подачі повітря. Встановлено, що при збільшенні подачі повітря для збільшення виходу деревного газу та досягнення максимальної концентрації CO необхідно збільшувати висоту камери відновлення. Бібл. 10, табл. 2, рис. 7.*

**Ключові слова:** газогенератор, деревний газ, висота камери відновлення, концентрація CO.

## JUSTIFICATION OF RECOVERY CHAMBER HEIGHT AND AIR SUPPLY INFLUENCE ON WOOD GAS OUTPUT AND QUALITY

Y. Yarosh<sup>1</sup>, G. Golub<sup>2</sup>, S. Kukharets<sup>1</sup>, N. Tsyvenkova<sup>1</sup>, V. Chuba<sup>2</sup>, R. Shvets<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Zhytomyr National Agroecological University

10008, 7 Staryi Blvd, Zhytomyr, Ukraine

<sup>2</sup>National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

03041, 15 Heroyiv Oborony St., Kyiv, Ukraine

*The research presents the influence of gasifier's technical and operational parameters, namely, the recovery chamber height and air supply on wood gas output and CO concentration in it. The optimum dimensions of recovery chamber were determined experimentally for different air supply values. It is established that if we increase air supply in order to increase the wood gas output and to reach the maximum CO concentration, it is necessary to increase the recovery chamber height. References 10, tables 2, fig. 7.*

**Keywords:** gasifier, wood gas, recovery chamber height, CO concentration.



Я.Д. Ярош  
Y. Yarosh

**Відомості про автора:** декан факультету інженерії та енергетики Житомирського національного агроекологічного університету, к.т.н., доцент кафедри процесів, машин і обладнання в агроінженерії.

**Наукова сфера:** біоенергетичні системи аграрного виробництва, технологічні засоби формування екологічнобезпечних проектів у агрохарчовій галузі.

**Публікації:** 70, з них 56 наукові (у тому числі 46 наукових праць, опублікованих у вітчизняних і 10 у міжнародних рецензованих фахових виданнях), 4 патенти та 14 навчально-методичного характеру.

**ORCID:** 0000-0001-6590-7058

**Контакти:** +38 (067) 796-24-49

e-mail: yaroslav.yarosh76@gmail.com

**Information about the author:** dean of Engineering and Energetic Faculty of Zhytomyr National Agroecological University, Ph.D, assis. prof. of Processes, Machinery, and Equipment in Agroengineering Department.

**Research area:** bioenergy systems of agrarian production, technological means of forming ecologically safe projects in the sphere of agro-food industry.

**Publications:** 70, including 56 scientific articles (46 scientific papers, which are published in Ukrainian peer-reviewed journals, and 10 – in international), 4 patents and 14 educational and methodical materials.

**ORCID:** 0000-0001-6590-7058

**Contacts:** +38 (067) 796-24-49

e-mail: yaroslav.yarosh76@gmail.com



Г.А. Голуб  
G. Golub

**Відомості про автора:** завідувач кафедрою тракторів, автомобілів та біоенергосистем Національного університету біоресурсів та природокористування України, д.т.н., професор.

**Наукова сфера:** енергозбереження, альтернативна енергетика, біоенергетичні системи і комплекси.

**Публікації:** 538, з них 376 наукові (у тому числі 363 наукових праць, опублікованих у вітчизняних і 13 у міжнародних рецензованих фахових виданнях), 95 патентів на винахід та 5 праць навчально-методичного характеру.

**ORCID:** 0000-0002-2388-0405

**Контакти:** +38 (095) 311-50-50

e-mail: gagolub@ukr.net

**Information about the author:** head of the Tractors, Automobiles, and Bioenergy Systems Department of National University of Life and Environmental Science of Ukraine. Professor, Doctor of Engineering Sciences.

**Research area:** energy saving, alternative energy, bioenergy systems and complexes.

**Publications:** 538, including 376 scientific articles (363 scientific papers, which are published in Ukrainian peer-reviewed journals, and 13 – in international), 95 patents and 5 educational and methodical materials.

**ORCID:** 0000-0002-2388-0405

**Contacts:** +38 (095) 311-50-50

e-mail: gagolub@ukr.net



С.М. Кухарець  
S. Kukharets

**Відомості про автора:** завідувач кафедрою механіки та інженерії агроєкосистем Житомирського національного агроєкологічного університету, д.т.н.

**Наукова сфера:** технічна біоенергетика, технічне забезпечення агроєкосистем.

**Публікації:** 155, з них 128 наукові (у тому числі 114 наукових праць, опублікованих у вітчизняних і 14 у міжнародних рецензованих фахових виданнях), 4 наукові монографії, 14 патентів на винахід та 27 праць навчально-методичного характеру (з них 1 підручник, 3 навчальні посібники).

**ORCID:** 0000-0002-5129-8746

**Контакти:** +38 (067) 665-35-48

e-mail: saveliy\_76@ukr.net

**Information about the author:** head of the Mechanics and Agroecosystems Engineering Department (Engineering and Energetic Faculty) of Zhytomyr National Agroecological University, D.Sc, prof. of the Mechanics, and Agroecosystems Engineering Department.

**Research area:** technical biotechnology, technical support of agroecosystems.

**Publications:** 155, including 128 scientific articles (114 scientific papers, which are published in Ukrainian peer-reviewed journals, and 14 – in international), 4 monographs, 14 patents and 27 educational and methodical materials.

**ORCID:** 0000-0002-5129-8746

**Contacts:** +38 (067) 665-35-48

e-mail: saveliy\_76@ukr.net



Н.М. Цивенкова  
N. Tsyvenkova

**Відомості про автора:** заступник декана з наукової роботи факультету інженерії та енергетики Житомирського національного агроєкологічного університету, к.т.н., доцент кафедри механіки та інженерії агроєкосистем.

**Наукова сфера:** енергозбереження, альтернативна енергетика, біоенергетичні системи і комплекси.

**Публікації:** 82, з них 65 наукові (у тому числі 55 наукових праць, опублікованих у вітчизняних і 10 у міжнародних рецензованих фахових виданнях), 2 патенти на винахід та 18 праць навчально-методичного характеру.

**ORCID:** 0000-0003-1703-4306

**Контакти:** +38 (050) 313-89-03

e-mail: nataliyatsyvenkova@gmail.com

**Information about the author:** deputy dean in science questions of Engineering and Energetic Faculty of Zhytomyr National Agroecological University, Ph.D, assis. prof. of the Mechanics and agroecosystems engineering Department.

**Research area:** energy saving, alternative energy, bionergetic systems and complex.

**Publications:** 82, including 65 scientific articles (55 scientific papers, which are published in Ukrainian peer-reviewed journals, and 10 – in international), 2 patents and 18 educational and methodical materials.

**ORCID:** 0000-0003-1703-4306

**Contacts:** +38 (050) 313-89-03

e-mail: nataliyatsyvenkova@gmail.com



V.V. Чуба  
V. Chuba

**Відомості про автора:** доцент кафедри тракторів, автомобілів та біоенергосистем Національного університету біоресурсів та природокористування України, к.т.н., доцент.

**Наукова сфера:** технічна біотехнологія, технічна підтримка агроєкосистем, взаємодія рушіїв з ґрунтом, оцінка життєвого циклу.

**Публікації:** 71, з них 46 наукових (у тому числі 38 наукових праць, опублікованих у вітчизняних і 7 у міжнародних рецензованих фахових виданнях), 2 монографії, 18 патентів на винахід та 3 праці навчально-методичного характеру.

**ORCID:** 0000-0002-4119-0520

**Контакти:** +38 (095) 277-71-10

e-mail: vvchuba@ukr.net

**Information about the author:** National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ph.D, assis. prof., the Tractors, Automobiles, and Bioenergy Systems Department, Mechanical and Technological faculty.

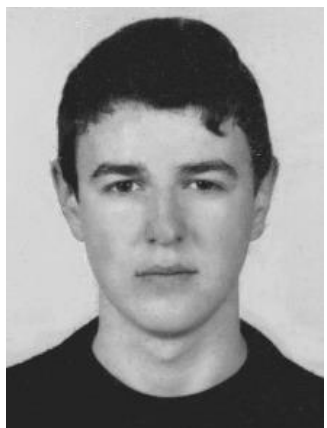
**Research area:** technological biotechnology, agroecosystems technical support, engines-soil interaction, life cycle estimation.

**Publications:** 71, including 46 scientific articles (38 scientific papers, which are published in Ukrainian peer-reviewed journals, and 7 – in international), 2 monographs, 18 patents, and 3 educational and methodical materials.

**ORCID:** 0000-0002-4119-0520

**Contacts:** +38 (095) 277-71-10

e-mail: vvchuba@ukr.net



Р.Л. Швець  
R. Shvets

**Відомості про автора:** завідувач лабораторіями кафедри тракторів, автомобілів та біоенергосистем Національного університету біоресурсів та природокористування України.

**Публікації:** 6 (5 наукових праць, опублікованих у вітчизняних і 1 у міжнародному рецензованому фаховому виданні).

**Наукова сфера:** біоенергетичні системи аграрного виробництва, технологічні засоби формування екологічно-безпечних проєктів у сфері агропродовольчої промисловості.

**ORCID:** 0000-0001-8935-4822

**Контакти:** +38 (096) 112-18-97

e-mail: shvetsromanl@gmail.com

**Information about the author:** head of laboratories of the Tractors, Automobiles, and Bioenergy Systems Department, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.

**Research area:** bioenergy systems of agrarian production, technological means of forming ecologically safe projects in the sphere of agro-food industry.

**Publications:** 6 (5 scientific papers, which are published in Ukrainian peer-reviewed journals, and 1 – in international).

**ORCID:** 0000-0001-8935-4822

**Contacts:** +38 (096) 112-18-97

e-mail: shvetsromanl@gmail.com

#### Перелік використаних позначень та скорочень:

$n_{CO}$  – концентрація монооксиду карбону, % об'єму;

$q_z$  – подача повітря в змішувач,  $m^3/s$ ;

$q_d$  – вихід деревного газу із газогенератора,  $m^3/s$ ;

$CO$  – покази газоаналізатора, % об'єму;

$Q_g$  – обсяг отриманого деревного газу,  $m^3/s$ ;

$q_a$  – подача повітря в газогенератор,  $m^3/s$ ;

$h_r$  – висота камери відновлення, мм.

**Вступ.** Значна кількість викидів парникових газів під час енергетичного використання викопних видів палива спонукає до використання обладнання, в якому використовується рослинна біомаса [4]. Однак, в процесі енергетичного використання загалом та спалювання, зокрема, рослинної біомаси, виникають труднощі, що пов'язані із неоднорідністю біомаси, високою вологістю, низькими теплотворною здатністю та температурою плавлення золи [4]. Одним із варіантів отримання стабільного надходження енергії споживачеві під час використання біомаси є використання газогенераторів [6].

Проте стабільна робота газогенераторів не можлива без узгодження конструкційних [10] та технологічних [9] параметрів із дослідженням їхнього впливу на якість отриманого газу. Під час дослідження такого впливу обґрунтовується якісний склад отриманого газу [1], оцінюється вплив на якісний склад газу таких параметрів як робоча температура в зонах окислення та відновлення [1], вологість біомаси [3], режими подачі повітря [2], вид та розміри біомаси [5].

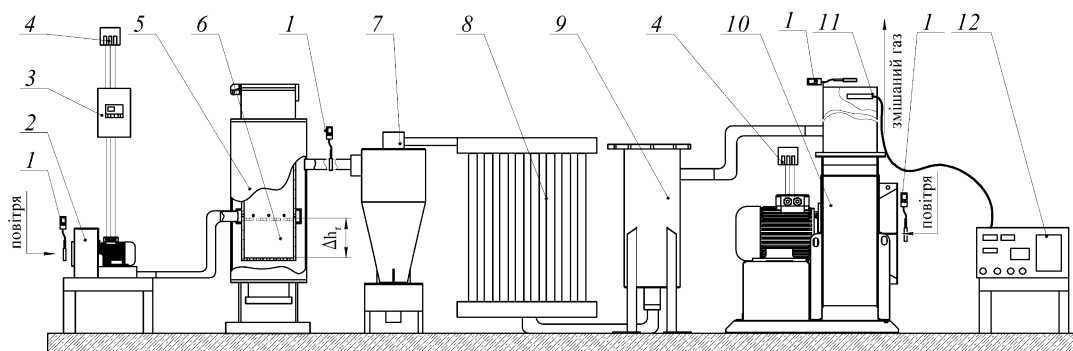
Встановлено, що важливу роль в утворенні деревного газу відіграють геометричні розміри камери відновлення [2], які визначаються із мір-

кувань дотримання раціональних температурних режимів протікання реакцій утворення деревного газу [1, 3]. Проте, дослідження температурних режимів при отриманні деревного газу є ускладненим для експериментального дослідження через різноманітність та швидкоплинність термохімічних процесів в камері відновлення [1, 3]. Тому важливу роль відіграють експериментальні дослідження, зокрема дослідження впливу геометричних параметрів камери відновлення і режимів надходження повітря в генератор на вихід та склад деревного газу.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження впливу параметрів газогенератора на вихід деревного газу та концентрацію CO в ньому. Для досягнення поставленої мети необхідно

встановити: залежність виходу деревного газу від висоти камери відновлення та подачі повітря; залежності концентрації CO у деревному газі від висоти камери відновлення та подачі повітря; узгодити геометричні параметри камери відновлення, а саме її висоту, з подачею повітря; динаміку зміни концентрації CO при зміні подачі повітря в залежності від висоти камери відновлення.

**Виклад основного матеріалу.** Методика дослідження впливу параметрів газогенератора на вихід деревного газу та концентрацію CO в ньому. Дослідження впливу параметрів конструкції та роботи газогенератора на вихід деревного газу та концентрацію CO в ньому проводилися в лабораторних умовах з використанням розробленої установки (рис. 1).



**Рис. 1. Схема дослідної установки:** 1 – анемометр Tenmars TM-402; 2 – повітродувка Goorui GHBH-0D5-34-1R2; 3 – частотний перетворювач Hitachi-3G3JX-A4075-EF; 4 – розетка 0,4 кВ; 5 – газогенератор ГГ-1; 6 – камера відновлення; 7 – фільтр грубого очищення; 8 – охолоджувач; 9 – фільтр тонкого очищення; 10 – змішувач; 11 – датчик CO; 12 – газоаналізатор Инфракар-М2Т.

**Fig. 1. Scheme of experimental installation:** 1 – anemometer Tenmars TM-402; 2 – blower Goorui GHBH-0D5-34-1R2; 3 – frequency converter Hitachi-3G3JX-A4075-EF; 4 – 0.4 kV socket; 5 – gas generator GG-1; 6 – chamber of chemical recovery; 7 – a coarse filter; 8 – cooler; 9 – fine purification filter; 10 – mixer; 11 – CO sensor; 12 – gas-analyzer Infrakar-M2T.

Установка складалася з газогенератора ГГ-1 із регульованою висотою камери відновлення, відцентрового нагнітального вентилятора із регульованою продуктивністю подачі повітря у газогенератор, змішувача, оснащеного відцентровим нагнітальним вентилятором, та інших компонентів.

Для встановлення взаємозв'язку впливу подачі повітря в газогенератор та висоти камери відновлення обсяг отриманого деревного газу та концентрацію CO, було проведено експериментальні дослідження. В якості сировини використовувалася деревина із твердих порід, що мала фракційний склад із стороною куба розміром від 10 до 40 мм.

Подача повітря в газогенератор забезпечувалася за допомогою відцентрового вентилятора (повітродувки Goorui GHBH-0D5-34-1R2), що був оснащений двигуном змінного струму на 0,4 кВ. Подача повітря змінювалася за рахунок зміни частоти обертів вентилятора шляхом зміни частоти струму на контактах його електродвигуна. Зміна частоти забезпечувалася частотним перетворювачем Hitachi-3G3JX-A4075-EF. Швидкість повітря контролювалася анемометром Tenmars TM-402.

Колосникова решітка газогенератора рухалася вздовж осі камери відновлення, що дозволило

змінювати висоту камери відновлення, діаметр якої становив 200 мм. Для вимірювання концентрації CO було використано газоаналізатор Інфракар-М2Т із діапазоном вимірювання концентрації CO в межах від 0 до 7%. Оскільки діапазон вимірювань використовуваного газоаналізатора недостатній, було зменшено концентрацію монооксиду карбону у визначених межах. Для цього було використано змішувач, що забезпечував пе-

ремішування деревного газу із генератора та повітря, що подавалося відцентровим вентилятором із навколишнього середовища.

Значення концентрації CO в деревного газі розраховувались за формулою:

$$n_{CO} = CO(q_z + q_d) / q_d \quad (1)$$

Інтервали значень та рівні варіювання досліджуваних факторів наведено в табл. 1.

**Таблиця 1. Інтервали значень та рівні варіювання досліджуваних факторів**

**Table 1. Intervals of values and levels of variation of investigated factors**

| Найменування факторів          | Розмірність | Позначення | Рівні факторів |         |         | Інтервали варіювання |
|--------------------------------|-------------|------------|----------------|---------|---------|----------------------|
|                                |             |            | -1             | 0       | +1      |                      |
| Подача повітря в газогенератор | м³/с        | $q_g$      | 0,00238        | 0,00594 | 0,00951 | 0,00713              |
| Висота камери відновлення      | мм          | $h_r$      | 5              | 78      | 151     | 73                   |

Отримані данні було оброблено за допомогою спеціального програмного забезпечення для аналізу багатфакторних експериментів.

*Результати аналізу експериментальних досліджень.* В результаті проведення експериментальних досліджень отримано результати, наведені в таблиці 2.

**Таблиця 2. Результати експериментальних досліджень**

**Table 2. Results of experimental researches**

| №  | Висота камери відновлення, мм | Подача повітря в газогенератор, м³/с | Вихід газу із газогенератора, м³/с | Вміст CO в газі, % | Перевищення виходу газу над надходженням повітря, разів | Відношення висоти камери відновлення до діаметра, разів |
|----|-------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------|---|---|
| 1  | 78                            | 0,00951                              | 0,016336282                        | 12,38              | 1,718202  | 0,39  |
| 2  | 78                            | 0,00238                              | 0,003644247                        | 8,42               | 1,533165  | 0,39  |
| 3  | 78                            | 0,00238                              | 0,005277876                        | 9,49               | 2,220445  | 0,39  |
| 4  | 78                            | 0,00951                              | 0,016587609                        | 13,63              | 1,744636  | 0,39  |
| 5  | 151                           | 0,00594                              | 0,009424778                        | 4,13               | 1,586032  | 0,755   |
| 6  | 5                             | 0,00594                              | 0,002764602                        | 5,54               | 0,465236  | 0,025   |
| 7  | 5                             | 0,00594                              | 0,006660176                        | 2,32               | 1,120796  | 0,025   |
| 8  | 151                           | 0,00594                              | 0,011686725                        | 8,05               | 1,96668   | 0,755   |
| 9  | 151                           | 0,00951                              | 0,018221237                        | 8,09               | 1,916456  | 0,755   |
| 10 | 5                             | 0,00238                              | 0,002890265                        | 5,30               | 1,215958  | 0,025   |
| 11 | 5                             | 0,00951                              | 0,012566371                        | 1,25               | 1,321694  | 0,025   |
| 12 | 151                           | 0,00238                              | 0,005026548                        | 3,83               | 2,11471   | 0,755   |
| 13 | 78                            | 0,00594                              | 0,010304424                        | 8,34               | 1,734062  | 0,39  |
| 14 | 78                            | 0,00594                              | 0,014074335                        | 8,40               | 2,368475  | 0,39  |
| 15 | 78                            | 0,00594                              | 0,008922123                        | 10,47              | 1,501444  | 0,39  |

Багатофакторний регресійний аналіз значень, наведених в таблиці 2, дозволив отримати рівняння, що описують залежність виходу отриманого деревного газу і вмісту CO в залежності від висоти камери відновлення та від подачі повітря.

$$Q_g = -0,0006 + 0,6273q_a + 7,2481 \cdot 10^{-5}h_r + 63,3038q_a^2 + 0,0034q_a h_r - 3,7957 \cdot 10^{-7}h_r^2, \quad (2)$$

$$n_{CO} = 6,2701 - 959,6038q_a + 0,1243h_r + 52846,388q_a^2 + 7,9806 q_a h_r - 0,001h_r^2. \quad (3)$$

Графічна інтерпретація рівняння (2) наведена на (рис. 2) у вигляді поверхні відгуку.

Аналізуючи поверхні відгуку (рис. 2) отримано графічні залежності (рис. 3) виходу деревного газу від висоти камери відновлення при мінімальній, середній та максимальній подачах повітря.

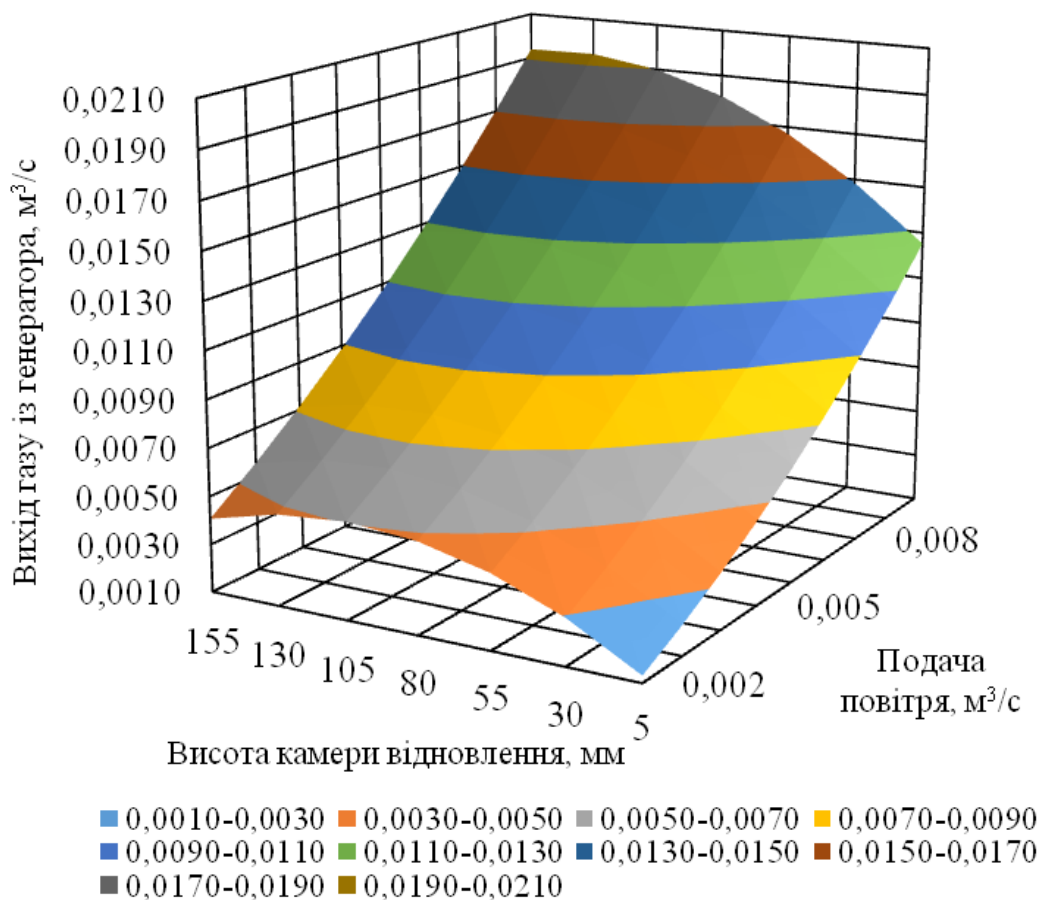


Рис. 2. Поверхня відгуку залежності виходу деревного газу від висоти камери відновлення та подачі повітря.

Fig. 2. Response surface of wood gas output against the recovery chamber height and air supply.

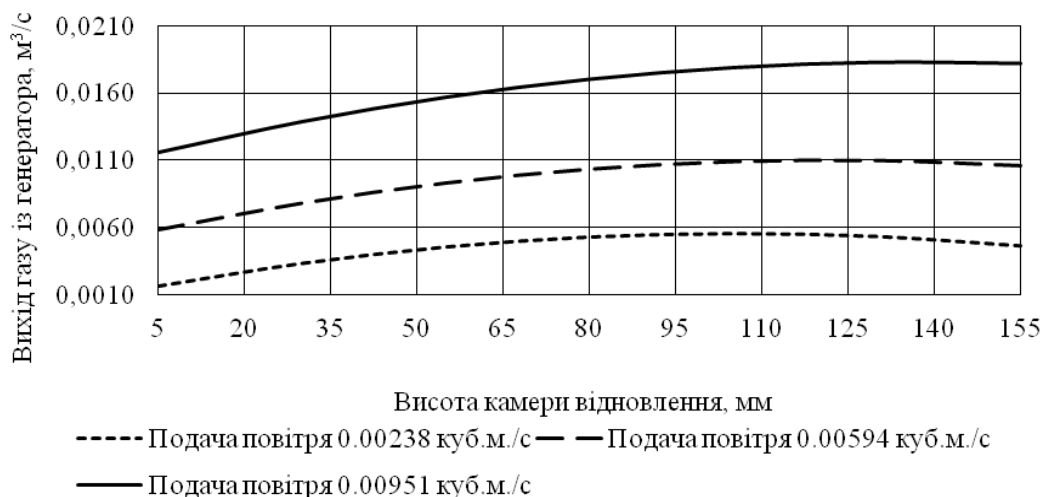


Рис. 3. Залежність обсягу деревного газу від висоти камери відновлення.

Fig. 3. Wood gas output against recovery chamber height.

Із аналізу графічних залежностей (рис. 3) видно, що при мінімальній подачі повітря 0,00238 м³/с оптимальна висота камери відновлення, при якій досягається максимальний вихід деревного газу, складає 110±2 мм, при середній подачі повітря 0,00594 м³/с оптимальна висота камери відновлення 125±2 мм, а при максималь-

ній подачі 0,00951 м³/с оптимальна висота камери відновлення 135±2 мм. Очевидно, що при збільшенні подачі повітря для досягнення максимального виходу деревного газу необхідно збільшувати висоту камери відновлення.

Графічна інтерпретація рівняння (3) наведена у вигляді поверхні відгуку (рис. 4).

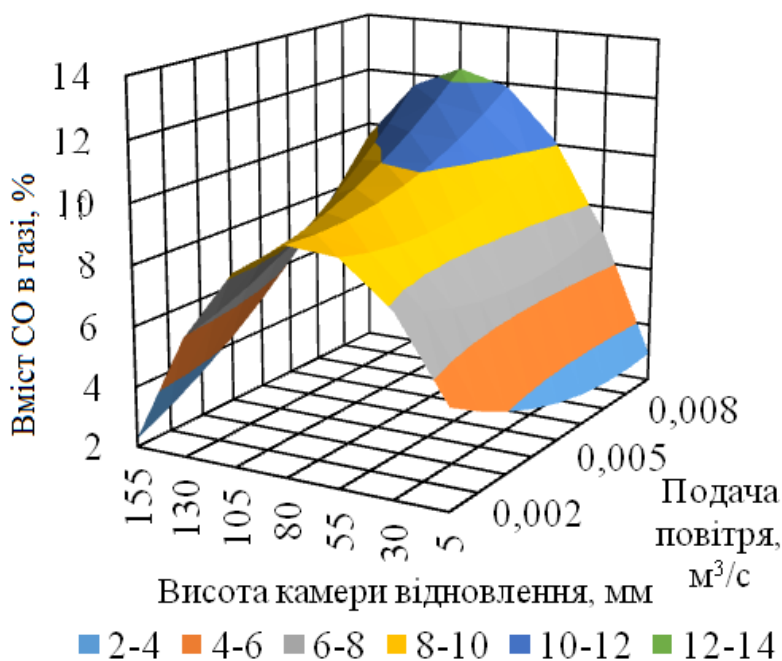


Рис. 4. Поверхня відгуку залежності концентрації CO деревного газу від висоти камери відновлення та подачі повітря.

Fig. 4. Response surface CO concentration in wood gas against recovery chamber height and air supply.

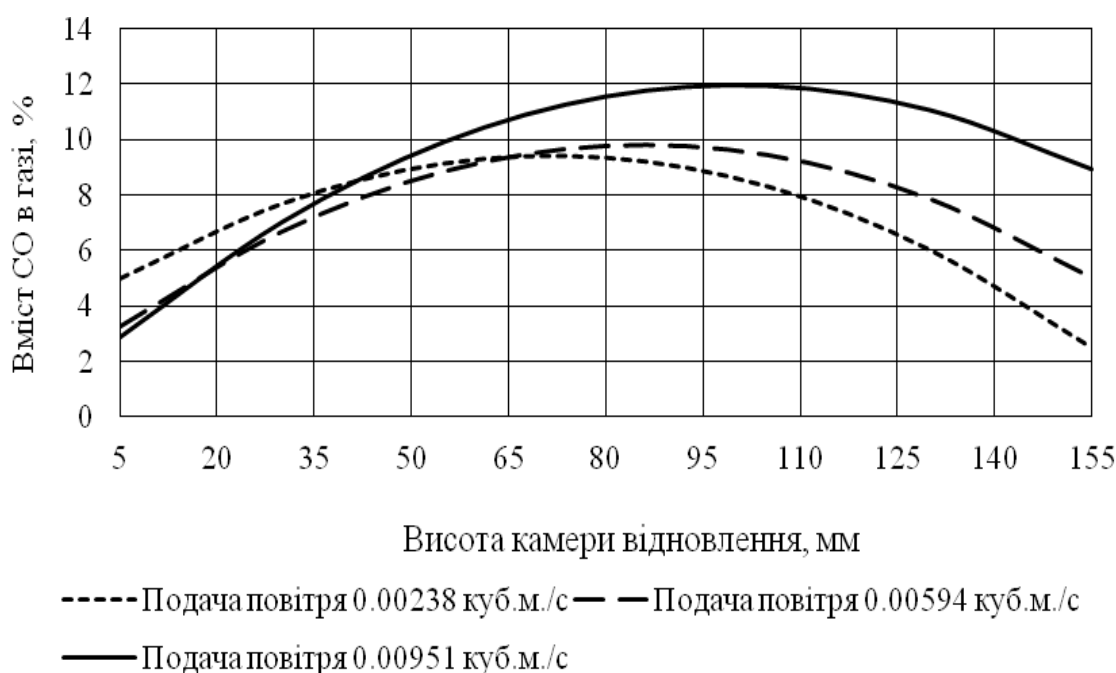


Рис. 5. Залежність вмісту CO у деревному газі від висоти камери відновлення.

Fig. 5. CO concentration in wood gas against recovery chamber height.

Аналіз поверхні відгуку (рис. 4) дозволив отримати графічні залежності (рис. 5) концентрації CO в деревному газі від висоти камери відновлення при мінімальній, середній та максимальній подачах повітря.

Із аналізу графічних залежностей (рис. 5) видно, що при мінімальній подачі повітря 0,00238 м³/с максимальна концентрація CO спостерігається при оптимальній висоті камери відновлення 70±2 мм, при середній подачі повітря 0,00594 м³/с максимальна концентрація CO спостерігається при оптимальній висоті камери відновлення 85±2 мм, а при максимальній подачі 0,00951 м³/с максимальна концентрація CO спостерігається при оптимальній висоті камери відновлення 102±2 мм. Очевидно, що при збільшенні подачі повітря для досягнення максимальної концентрації CO в деревному газі необхідно збільшувати висоту камери відновлення.

Збільшення висоти камери газифікації при збільшенні подачі повітря, в цілому, відповідає дотриманню висоти камери відновлення із оптимальним температурним режимом, як це описано

в дослідженнях [8]. Крім того, збільшення висоти камери відновлення призводить до збільшення кількості матеріалу, що знаходиться в камері відновлення, тому для забезпечення оптимального значення так званого коефіцієнту еквівалентності (ER) потрібна і більша подача повітря [2].

Отримані концентрації CO в деревному газі при дотриманні оптимальних значень висоти зони відновлення відповідали концентраціям CO, що були отримані при проведенні досліджень [7].

Із огляду на проведені дослідження для досягнення максимального обсягу деревного газу висота камери відновлення залежить від подачі повітря таким чином:

$$h_r = -198087q_a^2 + 5861,6q_a + 97,172. \quad (4)$$

Для досягнення максимальної концентрації CO в деревному газі висоту камери відновлення потрібно визначати за виразом:

$$h_r = 76917q_a^2 + 3573,5q_a + 61,059. \quad (5)$$

Графічно рівняння (4) та (5) відображено (рис. 6).



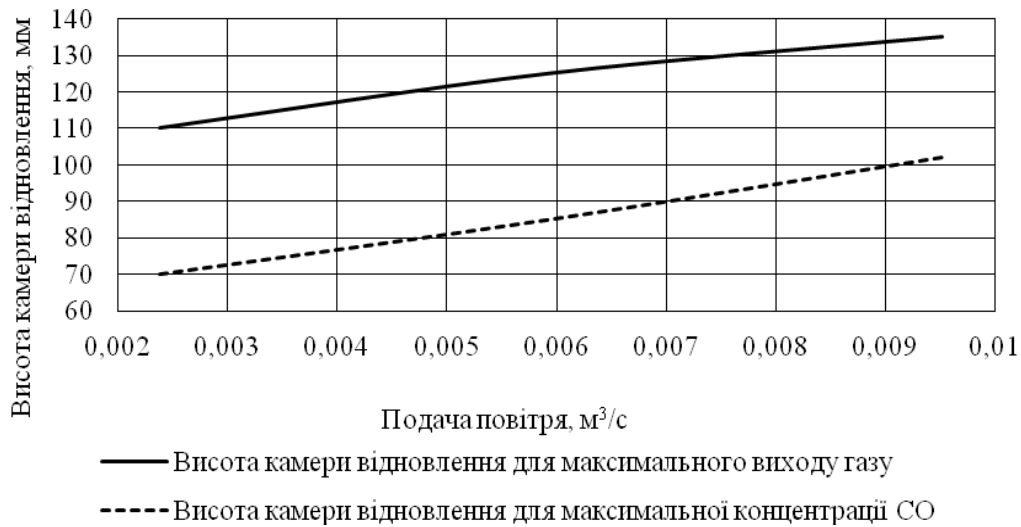


Рис. 6. Залежність висоти камери відновлення від подачі повітря.

Fig. 6. Recovery chamber height against air supply.

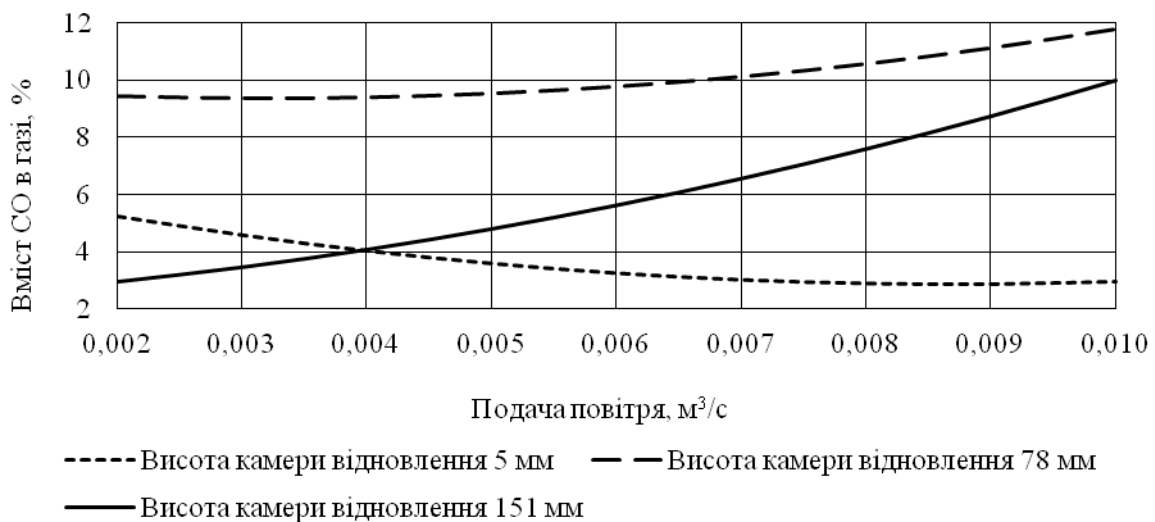


Рис. 7. Динаміка зміни концентрації CO при зміні подачі повітря для трьох значень висоти камери відновлення.

Fig. 7. CO concentration against air supply for three different values of recovery chamber height.

Цікавою є динаміка зміни концентрації CO при зміні подачі повітря в залежності від висоти камери відновлення (рис. 7).

Із графіків (рис. 7) видно, що при мінімальній висоті камери у разі збільшення подачі повітря концентрація CO зменшується. При максимальній висоті камери концентрація CO зростає інтенсивніше, ніж при середній висоті камери. Це свідчить про значний вплив висоти камери відновлення на процес утворення деревного газу.

**Висновки.** 1. При мінімальній подачі повітря 0,00238 м³/с оптимальна висота камери віднов-

лення, при якій досягається максимальний вихід деревного газу, складає 110±2 мм, при середній подачі повітря 0,00594 м³/с оптимальна висота камери відновлення 125±2 мм, а при максимальній подачі 0,00951 м³/с оптимальна висота камери відновлення 135±2 мм.

2. При мінімальній подачі повітря 0,00238 м³/с максимальна концентрація CO спостерігається при оптимальній висоті камери відновлення 70±2 мм, при середній подачі повітря 0,00594 м³/с максимальна концентрація CO спостерігається при оптимальній висоті камери від-

новлення  $85 \pm 2$  мм, а при максимальній подачі  $0,00951 \text{ м}^3/\text{с}$  максимальна концентрація CO спостерігається при оптимальній висоті камери відновлення  $102 \pm 2$  мм. Тому при збільшенні подачі повітря для збільшення виходу деревного газу та досягнення максимальної концентрації CO необхідно збільшувати висоту камери відновлення.

3. В газогенераторі при проходженні потоку гарячих газів із камери горіння через шар матеріалу у камеру відновлення утворюється CO та інші горючі гази ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ). При недостатній висоті камери відновлення термохімічні процеси у ній проходять частково, а при надмірній висоті – погіршується температурний режим та значно зростає опір проходженню газу. Це призводить до зменшення вмісту горючих речовин у деревному газі, а також зменшується обсяг самого газу. Саме тому важливо встановити оптимальне значення висоти камери відновлення в залежності від конструкційних параметрів газогенератора та від технологічних показників його роботи.

1. Channiwala S.A. Three zone equilibrium and kinetic free modeling of biomass gasifier – a novel approach / S.A. Channiwala, J.K. Ratnadhariya // *Renewable Energy*. – 2009. – Vol. 34, Iss. 4. – pp. 1050–1058. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.08.001>
2. Dafiqurrohman H. Air Intake Modification for Pyrolysis Optimization on Rice Husk Fixed Bed Downdraft Gasifier With Maximum Capacity of 30 Kg /Hour / H. Dafiqurrohman, A. Surjosatyo, F.R. Gibran // *International Journal of Technology*. – 2016. – №7 (8). – pp. 1352–1361. doi:10.14716/ijtech.v7i8.6889.
3. Dejtrakulwong C. Four Zones Modeling of the Downdraft Biomass Gasification Process: Effects of moisture content and air to fuel ratio / C. Dejtrakulwong, S. Patumsawad // 2013 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies (2013 Aedcee). – 2013. – №52. – pp. 142–149. doi:10.1016/j.egypro.2014.07.064
4. Golub G.A. Integrated use of bioenergy conversion technologies in agroecosystems / G.A. Golub, S.M. Kukharets, Y.D. Yarosh, V.V. Kukharets // *INMATEH – Agricultural Engineering*. – 2017. – Vol. 51, №1. – pp. 93–100.
5. Jayathilake R. Numerical and Experimental Investigation of Equivalence Ratio (ER) and Feedstock Particle Size on Birchwood Gasification / R. Jayathilake, S. Rudra // *Energies*. – 2017. – Vol. 10, Iss. 8. – pp. 1–19. doi:10.3390/en10081232
6. Patra T.K. Biomass gasification models for downdraft gasifier: A state-of-the-art review / T.K. Patra, P.N. Sheth // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 50. – pp. 583–593. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.012>

7. Ramos-Carmona S. Effect of Torrefied Wood Biomass under an Oxidizing Environment in a Downdraft Gasification Process / S. Ramos-Carmona, J.F. Perez // *Bioresources*. – 2017. – №12 (3). – pp. 6040–6061. doi:10.15376/biores.12.3.6040-6061
8. Salem A.M. An integrated kinetic model for downdraft gasifier based on a novel approach that optimises the reduction zone of gasifier / A.M. Salem, M.C. Paul // *Biomass and Bioenergy*. – 2018. – Vol. 109. – pp. 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.12.030>
9. Sheth P.N. Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier / P.N. Sheth, B.V. Babu // *Bioresource Technology*. – 2009. – Vol. 100, Iss. 12. – pp. 3127–3133. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.024>
10. Susastriawan A.A.P. Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review / A.A.P. Susastriawan, H. Saptoad, Purnomo // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 76. – pp. 989–1003. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.112>

#### ОБОСНОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИСОТЫ КАМЕРЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ПОДАЧИ ВОЗДУХА НА ВЫХОД И КАЧЕСТВО ДРЕВЕСНОГО ГАЗА

Я.Д. Ярош<sup>1</sup>, кандидат технических наук, Г.А. Голуб<sup>2</sup>, доктор технических наук, С.Н. Кухарец<sup>1</sup>, доктор технических наук, Н.М. Цивенкова<sup>1</sup>, кандидат технических наук, В.В. Чуба<sup>2</sup>, кандидат технических наук, Р.Л. Швец<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Житомирский национальный агроэкологический университет 10008 г. Житомир, Старый бульвар, 7

<sup>2</sup>Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины 03041 г. Киев, ул. Героев Оборона, 15

*Представлено исследование влияния технико-эксплуатационных параметров газогенератора, а именно высоты камеры восстановления и подачи воздуха на выход древесного газа и концентрацию CO в нем. Экспериментально определены оптимальные размеры камеры восстановления при различных значениях подачи воздуха. Установлено, что при увеличении подачи воздуха для увеличения выхода древесного газа и достижения максимальной концентрации CO необходимо увеличивать высоту камеры восстановления. Библ. 10, табл. 2, рис. 7.*

**Ключевые слова:** газогенератор, древесный газ, высота камеры восстановления, концентрация CO.

#### REFERENCES

1. Channiwala S.A., Ratnadhariya J.K. (2009). Three zone equilibrium and kinetic free modelling of biomass gasifier – a novel approach. *Renewable Energy*, 34 (4), 1050–1058 [in Eng.]. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.08.001>
2. Dafiqurrohman H., Surjosatyo A., Gibran F.R. (2016). Air Intake Modification for Pyrolysis Optimization on Rice Husk Fixed Bed Downdraft Gasifier With Maximum Capacity of

30 Kg/Hour. *International Journal of Technology*, 7 (8), 1352–1361 [in Eng.]. doi:10.14716/ijtech.v7i8.6889.

3. *Dejtrakulwong C., Patumsawad S.* (2014). Four Zones Modeling of the Downdraft Biomass Gasification Process: Effects of moisture content and air to fuel ratio. *2013 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies*, 52, 142–149 [in Eng.]. doi:10.1016/j.egypro.2014.07.064

4. *Golub G.A., Kukharets S.M., Yarosh Y.D., Kukharets V.V.* Integrated use of bioenergy conversion technologies in agroecosystems. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 51 (1), 93–100 [in Eng.].

5. *Jayathilake R., Rudra S.* (2017). Numerical and Experimental Investigation of Equivalence Ratio (ER) and Feedstock Particle Size on Birchwood Gasification. *Energies*, 10 (8) [in Eng.]. doi:10.3390/en10081232

6. *Patra T.K., Sheth P.N.* (2015). Biomass gasification models for downdraft gasifier: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 583–593 [in Eng.]. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.012>

7. *Ramos-Carmona S., Perez J F.* (2017). Effect of Torrefied Wood Biomass under an Oxidizing Environment in a Downdraft Gasification Process. *Bioresources*, 12 (3), 6040–6061 [in Eng.]. doi:10.15376/biores.12.3.6040–6061

8. *Salem A.M., Paul M.C.* (2018). An integrated kinetic model for downdraft gasifier based on a novel approach that optimises the reduction zone of gasifier. *Biomass and Bioenergy*, 109, 172–181 [in Eng.]. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.12.030>

9. *Sheth P.N., Babu B.V.* Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier. *Bioresource Technology*, 100 (12), 3127–3133 [in Eng.]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.024>

10. *Susastriawan A.A.P., Saptoad H., Purnomo.* Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 989–1003 [in Eng.]. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.112>

#### SYNOPSIS

Using vegetal biomass for energy receiving reveals a lot of difficulties connected with biomass inhomogeneity, its high moisture content, low calorific value and low ash melting temperature. One of the variants of receiving stable energy supply, when using biomass, is using gasifier. However, gasifier stable functioning is impossible without the coordination of its design and technological parameters and without investigation of their influence on wood gas quality.

So, the aim of this investigation is to determine gasifier design-technological parameters influence on wood gas output and CO concentration in it.

In this work, an experimental installation is used, consisted of gasifier, gas cooling and purified system, air supply system and gas analyzer. To determine the interconnection between air supply,

recovery chamber height and wood gas quantity and CO concentration in it experiments were done. As a raw material, cubic shape wood pieces of hardwood with side measurements from 10 to 40 mm were used.

With the multifactor regressive analysis on equations that describes dependencies were received. Namely wood gas output dependency from recovery chamber height, CO concentration dependency from recovery chamber height, recovery chamber height dependency from an air supply, CO concentration dependency from air supply for different recovery chamber heights.

The results show that for minimal recovery chamber height when the air supply is growing, CO concentration goes down. For maximal recovery chamber, height CO concentration rises more rapidly than for medium chamber height. So recovery chamber height influences wood gas producing greatly.

#### РЕФЕРАТ

В процесі використання рослинної біомаси для енергетичних потреб виникають труднощі, пов'язані із неоднорідністю біомаси, високою вологістю, низькими теплотворною здатністю та температурою плавлення золи. Одним із варіантів отримання стабільного надходження енергії споживачеві при використанні біомаси є використання газогенераторів. Проте стабільна робота газогенераторів неможлива без узгодження їхніх конструкційних та технологічних параметрів, та без дослідження їхнього впливу на якість отриманого газу.

Отже, метою цієї роботи є дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів газогенератора на вихід деревного газу та концентрацію CO в ньому.

В роботі представлено лабораторну установку, яка складається з газогенератора, системи очищення та охолодження деревного газу, системи подачі повітря та газоаналізатора. Для встановлення взаємозв'язку між подачею повітря в газогенератор, висотою камери відновлення і об'ємом отриманого деревного газу та концентрацією CO в ньому, було проведено експериментальні дослідження. В якості сировини використовувалась деревина твердих порід геометричної форми куб зі стороною від 10 до 40 мм.

За допомогою багатофакторного регресійного аналізу отримано рівняння, що описують залежності, а саме: залежність обсягу деревного газу від висоти камери відновлення; залежність вмісту CO у деревному газі від висоти камери відновлення; залежність висоти камери відновлення від подачі повітря; динаміка зміни концентрації CO при зміні подачі повітря в залежності від висоти камери відновлення.

Результати дослідження свідчать, що при мінімальній висоті камери відновлення при збільшенні подачі повітря концентрація CO зменшується. При максимальній висоті камери відновлення концентрація CO зростає інтенсивніше, ніж при середній висоті камери. Це свідчить про значний вплив висоти камери відновлення на процес утворення деревного газу.

Стаття надійшла до редакції 20.06.18  
Остаточна версія 22.08.18