

УДК 662.76.035+662.63

**В.В. Клименко, проф., д-р техн. наук, В.І. Кравченко, доц., канд. техн. наук**  
*Кіровоградський національний технічний університет*

## Газифікація твердих біопалив та обґрунтування конструкції газогенераторів для її провадження

Проведено аналіз конструкцій газогенераторів твердих біопалив та обґрунтовано для умов роботи у складі автономних енергетичних установок вибір типу газогенератора та виду газифікуючого агенту. Визначено та проаналізовано основні характеристики процесу газифікації твердих біопалив, зокрема у вигляді пелет, що впливають на якість та теплоту згоряння синтез-газу. Надано рекомендації для розрахунку основних конструктивних елементів газогенераторів з урахуванням особливостей процесу газифікації твердих біопалив та вимог до якості синтез-газу.

**біопаливо, пелети, газифікація, газогенератор, синтез-газ, автономна енергетична установка**

**В.В. Клименко, В.И. Кравченко**

*Кировоградский национальный технический университет*

**Газификация твердых биотоплив и обоснование конструкции газогенераторов для ее осуществления**

Проведен анализ конструкций газогенераторов твердых биотоплив и обосновано для условий работы в составе автономных энергетических установок выбор типа газогенератора и вида газифицирующего агента. Определено и проанализировано основные характеристики процесса газификации твердых биотоплив, в частности в виде пелет, которые влияют на качество и теплоту сгорания синтез-газа. Представлено рекомендации для расчета основных конструктивных элементов газогенераторов с учетом особенностей процесса газификации твердых биотоплив и требований к качеству синтез-газа.

**биотопливо, пелеты, газификация, газогенератор, синтез-газ, автономная энергетическая установка**

**Вступ.** Розвиток лісових, фермерських та інших господарств аграрної галузі неможливий без забезпечення їх енергією для досягнення високої продуктивності праці та нормальних умов життя. Створення автономних енергетичних установок (АЕУ) для виконання будь-яких технологічних процесів або операцій, які працювали б на місцевих біоресурсах (дерево, солома, торф, тощо) – є одним із шляхів для вирішення цього питання [1,2]. Така АЕУ повинна мати у своєму складі силовий агрегат, в якості якого найчастіше використовується тепловий двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ). Безпосередньо для його живлення використовувати тверде біопаливо неефективно, а в більшості випадків і неможливо. Тому виникає необхідність у газифікації твердого біопалива, що обумовлює застосування у складі АЕУ газогенератора.

**Постановка проблеми.** Технологія газифікації копалин, деревинних відходів та конструкції газогенераторів для продукування з них синтез-газу вже відомі, але на сучасному етапі виробляється велика різноманітність калорійного штучного брикетованого та гранульованого біопалива, з відмінними від традиційних місцевих палив властивостями. Тому відсутність ефективних конструкцій газогенераторів для термічної переробки біопалива у вигляді пелет обумовлює пошук раціональних рішень з цього питання.

**Аналіз публікацій і досліджень.** Теоретичне висвітлення й практичний розвиток газифікація рослинних відходів отримала в Радянському Союзі у 30–50-х роках минулого століття [3]. В той час були створені і використовувалися низка конструкцій транспортних газогенераторів, які переважно працювали на деревинних відходах [4,5].

На теперішній час розроблено велику кількість різних методів газифікації твердого палива і конструкцій газогенераторів в залежності від призначення синтез-газу, якості початкового палива, виду газифікуючого агента, тиску, тощо [6]. Особливість розробки конструкції газогенератора для АЕУ пов'язана з питаннями застосування виду палива, газифікуючого агента, вибором типу процесу газифікації палива і отриманням якісного синтез-газу для подальшого його використання в ДВЗ або менш якісного, наприклад у двигуні Стірлінга.

Крім деревини, в газогенераторах АЕУ може бути використано інший вид біомаси – відходи рослинництва (солома, лушпиння, тощо), які мають невисоку початкову вологість, а за теплою згоряння майже не поступаються деревинним відходам.

Вплив фізичних і теплотехнічних властивостей таких біопалив, спосіб їх газифікації та склад газифікуючого агента на ефективність процесу газифікації, конструкцію газогенератора остаточно ще не вивчено, тому доцільно продовжити дослідження в цьому напрямку.

**Основні матеріали досліджень.** Використання технології термохімічної газифікації, в результаті якої одержують синтез-газ, дозволяє більш ефективно використовувати енергоресурс твердих біопалив. За такої технології необоротні втрати при перетворенні енергії палива в теплоту завжди менші, ніж при спалюванні палива без попередньої термохімічної переробки. Так, ефективність перетворення енергії палива в теплоту при температурі 930 °С, яка запасена у СО, у порівнянні з перетворенням тієї енергії, яка запасена у вуглеці при його прямому окисленні, вище приблизно на 7% [7].

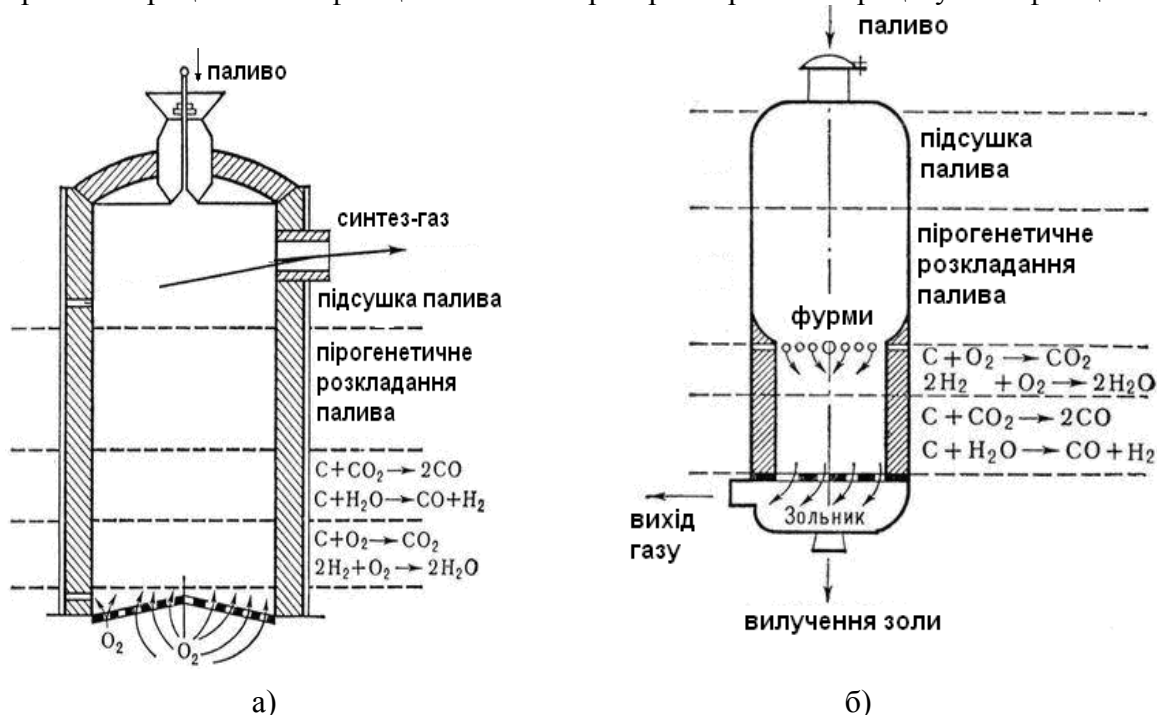
Склад синтез-газу, одержаного в результаті термічної газифікації, залежить від типу твердого біопалива, газифікуючого агента й умов проведення процесу. Синтез-газ після очистки від смол та домішок можна безпосередньо використовувати у теплових двигунах АЕУ.

Сьогодні на ринку палива крім необроблених деревинних відходів, соломи, лушпиння тощо, пропонується біопаливо у вигляді пелет і брикетів, отриманих з цих матеріалів, які мають інші фізико-механічні характеристики, ніж ці відходи, а за теплотворною здатністю наближаються до кам'яного вугілля. Використання такого палива при роботі газогенератора підвищить ККД процесу газифікації, оскільки у порівнянні з необробленим біопаливом його вологість менша, а теплотворна здатність вища. Енергетичні показники деяких видів твердого палива показані у табл. 1.

Таблиця 1– Порівняльні характеристики деяких твердих видів палив

Вид палива	Теплота згоряння МДж/кг	Зольність, %	Вихід летких, %
Кам'яне вугілля	20,9 – 30,1	10 – 35	9 – 50
Буре вугілля	10,5 – 15,7	10 – 35	40
Торф (20 % вологості)	15,1		70
Деревина (40 % вологості)	6,0 – 11,0	2,0	80 - 95
Пелети	17,0 – 21,0	0,5 – 9,0	75 - 90

Процес газифікації біомаси відбувається у газогенераторних апаратах. Для АЕУ доцільно застосовувати газогенератори, в яких щільний шар палива рухається зверху вниз. Їх можна поділити на апарати з прямим (рис. 1а), зворотним (рис. 1б) і поперечним процесом газифікації. В газогенераторах прямого процесу газифікації



а) прямого процесу газифікації; б) зворотного процесу газифікації  
Рисунок 1 – Схеми газогенераторів для газифікації твердого біопалива

біомаса спочатку просушується генераторним газом, який рухається вгору, потім тверда сировина розкладається з утворенням вуглистої речовини, яка продовжує рухатися вниз і проходить стадію газифікації. Пароподібні продукти піролізу виносяться вгору гарячим генераторним газом. Смоли, що містяться в цих продуктах, частково конденсуються на холодній сировині, яка опускається, а частково виносяться з реактора виробленим синтез-газом. Концентрація смол при такій технології в газі збільшується і може досягати 10-100 г/м<sup>3</sup>. Внаслідок значного вмісту смол, без додаткової очистки такий газ може спалюватися тільки в топках котлів.

Характерною рисою зворотного процесу газифікації є рух газу вниз через щільний шар сировини. Така технологія забезпечує одержання відносно чистого генераторного газу з вмістом смол 50-500 мг/м<sup>3</sup>. Досвід свідчить, що такий газ може використовуватися у газодизельних електростанціях невеликої потужності [3].

Газогенератори з поперечним рухом газу в роботі схожі з газогенераторами зворотного процесу газифікації. Газифікуючий агент у них підводиться в реактор через бокову стінку в нижній частині корпусу, а синтез-газ відводиться з нього з протилежного боку. Широкого розповсюдження газогенератори такої конструкції не одержали через нестабільність процесу газифікації [3,4].

Склад газифікуючого агента та термодинамічні умови проведення процесу газифікації суттєво впливають на теплотворну здатність синтез-газу.

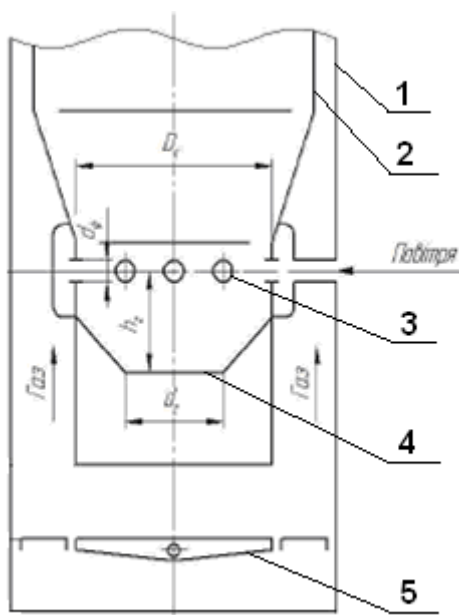
Газ, з низькою теплотою згорання (3,5...6,0 МДж/м<sup>3</sup>) утворюється при газифікації палива з застосуванням повітря або з суміші пари з повітрям при тиску, близькому до атмосферного. Такий газ характеризується високим вмістом баласту, а саме азоту до 40...50 %, що і обумовлює його низьку теплоту згорання.

Газ з середньою теплотою згоряння ( $10 \dots 20 \text{ МДж/м}^3$ ) одержують в процесах газифікації палива з застосуванням пари або з парокисневої суміші під тиском до  $2 \dots 2,5 \text{ МПа}$  або при аллотермічній греакції. За складом він являє собою суміш оксидів вуглецю і водню з невеликими кількостями метану та інших вуглеводнів. За економічною доцільністю газу з такою теплотою згоряння застосовують в обмежених масштабах як хімічну сировину та в металургії.

Газу з високою теплотою згоряння (більше  $20 \text{ МДж/м}^3$ ), що наближаються за цим показником до природного газу, одержують за рахунок газифікації при підвищених тисках та технології вилучення зі складу синтез-газу  $\text{CO}_2$ . Економічно обґрунтовано виробляти такий синтез-газ в стаціонарних установках великої продуктивності.

Оскільки технічна реалізація двох останніх способів одержання синтез-газу в газогенераторах АЕУ суттєво збільшує капітальні витрати на її спорудження і підвищує вимоги до кваліфікації персоналу, який її експлуатує, тому доцільним для газифікації твердого біопалива в цьому випадку є застосування повітряного газифікуючого агента, при тиску близькому до атмосферного.

Для забезпечення ефективної роботи теплового двигуна необхідно щоб синтез-газ містив мінімальну кількість смол та інших домішок. Це обґрунтовує застосування для його виробництва газогенераторів зі щільним шаром палива і зворотним процесом газифікації (рис.1б), схема камери газифікації якого показана на рис. 2. Такі апарати прості в конструктивному оформленні та більш надійні при експлуатації. Отриманий



1 – корпус газогенератора; 2 – внутрішній бункер; 3 – фурми; 4 – горловина;  
5 – колосникова решітка

Рисунок 2 – Схема камери газифікації газогенератора зворотного процесу

в них синтез-газ хоч і має відносно низьку теплоту згоряння, але придатний, як показує досвід, для використання його у ДВЗ [3] та суттєво підвищує економічну і екологічну ефективність застосування твердого біопалива [4,5]. Для газифікації подрібненої соломи доцільно використати газогенератор зворотного процесу, в якому застосовано заглиблені у шар периферійні фурми, що подають повітря в центральну частину камери газогенератора [3].

Для більш повного розкладання смолистих речовин, отже і підвищення якості синтез-газу, в такій камері газифікації створюють місцеве звуження  $d_g$  (горловина). За

такої форми камери потік повітря і гарячих газів спрямовується від фурм до її центру, внаслідок чого температура в ній підвищується, що сприяє більш повному розкладанню смол при проходженні їх через розжарений вуглець.

При газифікації соломи, в тому числі і у вигляді пелет та брикетів, значною проблемою є низька температура плавлення її золи, вміст якої складає 5,5...9,0 % (проти 0,5...2,0 % для деревини) [6]. Можливе утворення золошлакових агломератів, які перешкоджають горінню, також треба враховувати при виборі діаметра місцевого звуження горловини та розмірів інших конструктивних елементів камери газифікації. Враховуючи, що за фізико-механічними характеристиками пелети з соломи наближаються до торфобрикетів та відходів з деревини, для них орієнтовно можна прийняти такий же вираз для визначення діаметра горловини [5]:

$$d_z = \frac{D_k}{\sqrt{m}},$$

де  $D_k$  – діаметр камери газифікації;

$m$  – показник, який враховує тип палива, для торфобрикетів  $m=4$ , для відходів з деревини  $m=5$ .

За аналогічними рекомендаціями відстань від фурменого пояса до горловини:

$$h_z = (0,4 \div 0,44) D_k.$$

Кількість фурм по периферії камери можна визначити за формулою [5]

$$n = \frac{\pi D_k}{l_\phi},$$

де  $l_\phi$  - відстань між фурмами по периметру, що приймають звичайно 100–150 мм.

В камері газифікації рекомендується встановлювати кількість фурм в межах від 5 до 24 [5].

Площа перетину фурменого пояса камери газифікації визначається за формулою [5]:

$$F_k = \frac{Q_n^p \cdot G}{B},$$

де  $Q_n^p$  - нижча теплота згоряння палива, кДж/кг;

$G$  – годинна витрата палива, кг;

$B$  – теплова напруга камери газифікації, кДж/(м<sup>2</sup>·год).

При виборі діаметру фурменого пояса потрібно враховувати, що для ефективної роботи камери газифікації її теплова напруга повинна бути в межах (2,9...8,3)·10<sup>6</sup> кДж/(м<sup>2</sup>·год) [4,5].

Діаметр фурменого пояса газогенератора для газифікації соломи-січки з периферійним підведенням повітря можна визначити за виразом [5]:

$$D_k = 1,13 \sqrt{F_k}.$$

Збільшення діаметра фурменого пояса підвищує потужність двигуна, але при цьому в синтез-газі зростає вміст смол і використання камери газифікації без горловини або підвищує навантаження на систему очистки газу або унеможливорює одержання якісного кінцевого продукту в газогенераторі. Крім того, аналіз досліджень показує, що при збільшенні діаметра фурменого пояса в межах від 270 до 325 мм, тобто при зменшенні напруженості горіння, зростає годинне шлакоутворення [4,5].

Діаметр фурм для надходження повітря в зону горіння можна розрахувати за виразом [4]:

$$d_{\phi} = 18,85 \sqrt{\frac{V_n}{n\omega\phi}},$$

де  $\omega$  – швидкість подачі газифікуючого агента (в газогенераторах зворотного процесу газифікації  $\omega = 14\text{--}16$  м/с);

$n$  – кількість фурм;

$\phi$  – коефіцієнт витікання повітря з фурм (для циліндричних фурм  $\phi = 0,63$ , для фурм, що звужуються,  $\phi = 0,82$ ),

$V_n$  – витрата повітря в газогенераторі, м<sup>3</sup>/год.

При підвищенні значення інтенсивності газифікації зростає температура в активній зоні камери газифікації, при цьому рівноважний склад газу зміщується в бік вмісту більшої кількості горючих компонентів CO і H<sub>2</sub>, в результаті чого зростає теплотворна здатність газу.

Кількість палива, яке може бути з достатньою ефективністю перетворене в якісний синтез-газ в камері газифікації, визначається її основними розмірами: діаметром фурменого поясу  $D_k$  (рис. 1), висотою камери  $H_k$  (висота активної зони) та інтенсивністю газифікації  $q$ , кг/(м<sup>2</sup>·год) [4]:

$$q = G / F_k.$$

При підвищенні інтенсивності газифікації зростає температура в активній зоні камери газифікації, при цьому рівноважний склад газу зміщується в бік вмісту більшої кількості горючих компонентів CO і H<sub>2</sub>, в результаті чого поліпшується якість та теплотворність синтез-газу.

Однак підвищення  $q$  збільшує швидкість проходження газу в шарі палива, в результаті чого посиляться опір газогенератора, а отже зменшиться тиск синтез-газу на вході в ДВЗ. Крім того, при використанні біопалив з високим вмістом золи підвищення  $q$  може призвести до надмірного утворення шлаку в камері газифікації, що негативно вплине на ефективність роботи двигуна. Тому необхідна оптимізація вибору  $q$  для певних конструкцій газогенераторів твердого біопалива.

### Висновки.

1. Виконано аналіз конструкцій газогенераторів твердих біопалив за способом подачі газифікуючого агента та його складу.

2. Визначено та проаналізовано основні характеристики процесу газифікації твердих біопалив, зокрема соломи, що впливають на якість та теплотворну здатність синтез-газу.

3. Обґрунтовано вибір основних конструктивних елементів газогенераторів твердих біопалив та надано рекомендації для їх розрахунку, зокрема для умов застосування газогенераторів в складі автономних енергетичних установок.

### Список літератури

1. Dinkelbach I. Gasification of biomass in Europe / I. Dinkelbach, M. Kaltschmitt //Proc. Of the 9<sup>th</sup> Europe. Bioenergy Conf., Copenhagen, 24-27 June, 1996, – Pergamon, 1996, – Vol. 2. – P. 1382-1387.

2. Клименко В.В. Підвищення ефективності використання місцевого палива автономною енергетичною установкою / В.В. Клименко, В.І. Кравченко, В.П. Солдатенко // Матеріали V-ої всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. «Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення». 22-23 травня 2013 року. – Первомайськ:ППІ НУК, 2013. – С.250-253.
3. Колеров Л.К. Газомоторные установки / Л.К. Колеров. – М.: Машгиз, 1951. – 240 с.
4. Токарев Г.Г. Газогенераторные автомобили / Г.Г. Токарев. – М.: Машгиз, 1955. – 207 с.
5. Юдушкин Н.Г. Газогенераторные тракторы / Н.Г. Юдушкин. – М.: Машгиз, 1955. – 244 с.
6. Гелетуша Г.Г. Обзор технологий газификации биомассы / Г.Г. Гелетуша, Т.А.Железная. – Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1998. - №2. – С. 21-29.
7. Кравченко В.І. Підвищення ефективності використання місцевих видів палива в котельній техніці. // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація /. – Вип. 25. Ч. II – Кіровоград: КНТУ, 2012. – С. 151-154.

**Vasiliy Klymenko, Vladimir Kravchenko**

*Kirovograd National Technical University*

**Gasification of hard biofuels and ground of construction of gasogenes for his introduction**

For work in forest, farms and other farms with production of heat and electric energy are required Autonomous energy installation. Such installations are composed of heat engine, running on local raised over the biological resources (wood, straw, etc), processed in the generator gas into synthesis gas. For creating the design of the gas generator analysis of gasification of pellets and briquettes of biofuel. The technology of gasification of solid biofuels in gas generators. Considered design of the gas generators, which ensure productivity and quality of synthesis-gas from solid fuel, as well as the conditions of slagging.

The influence of the construction elements of the gasification chamber on the productive and efficient operation of the gas generator and offered constructive parameters for the work of its pellet.

Found that the greatest impact on the quality of synthesis gas by such structural elements as the diameters of фурменного belt and neck, the number of lances and some others, which, depending on the type of biofuel can modify their settings.

Physical-mechanical and thermophysical characteristics of granular biofuels different from the usual, so it is reasonable to conduct a study to determine the structural elements of the gas generator, efficiency of the gasification and quality of synthesis gas, using new types of biofuel in the form of pellets and briquettes.

**biofuels, pallets, gasification, gasogenes, synthetic gas, Autonomous energy installation**

Одержано 20.11.13

**УДК 631.361.22:001.891.5**

**А. В. Колесников, асп.**

*Луганский национальный аграрный университет, г. Луганск*

## **К методике проведения экспериментальных исследований молотильно-сепарирующего устройства**

Изложена часть методики экспериментальных исследований и описаны приборы и оборудование, необходимые для обоснования технологического процесса обмолота зернобобовых культур и подтверждения теоретических параметров и режимов работы молотильно-сепарирующего устройства с упругим элементом.

**молотильно-сепарирующее устройство, зернобобовые, боб, обмолот, повреждения семян**

© А. В. Колесников, 2013