

10. Beenackers, A. Gasification Technologies for Heat and Power from Biomass [Текст] / A. Beenackers, K. Maniatis // Ibid. – 1996. – Т 13(1). – с. 228-259.
11. Basu, P. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory [Текст] / P. Basu. – Elsevier Science, 2010. – 376 с.

*В статті представлено фізичну модель процесу пароповітряної газифікації тирси в псевдозрідженому шарі, математичну модель розрахунку ентальпій утворення продуктів реакції, графічне зображення концентрації вихідних компонентів утворених при температурі 1100 °С. Наведено розрахункові дані (витрати енергії та кількість CO і H<sub>2</sub> на виході) при температурі 1100 °С*

*Ключові слова: пароповітряна газифікація, температурний режим, окисник, тирса, псевдозріджений шар, горючий газ*

*В статье представлены физическая модель процесса паровоздушнoй газификации опилок в псевдоожигенном слое, математическая модель расчета энтальпий образования продуктов реакции, графически изображены концентрации исходных компонентов образованных при температуре 1100 °С. Приведены расчетные данные (расход энергии и количество CO и H<sub>2</sub> на выходе) при температуре 1100 °С*

*Ключевые слова: газификация, температурный режим, окислитель, опилки, псевдоожигенный слой, горючий газ*

УДК 662.76

# ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ПРОХОДЖЕННЯ ПАРОВОПІТРЯНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ТИРСИ В ПСЕВДО- ЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

О. Г. Орайло

Інженер I категорії\*

E-mail:olja\_orajlo@ukr.net

В. В. Собченко

Кандидат технічних наук, заступник директора\*

О. А. Негода

Інженер I категорії\*

\*Інститут газу НАН України

вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, Україна, 03113

## 1. Вступ

За оцінками фахівців в області лісопромисловості протягом року від усіх видів лісопереробки утворюється близько 200 тисяч тонн тирси. Ще близько 120 тисяч тонн – це так звана біомаса (гілки, хмиз, пошкоджена деревина, кора, листя, а також кукурудзяне бадилля, солома та інша органіка), що утворюється на місцях лісосік тощо і, як правило, просто перегниває.

На багатьох підприємствах актуальним є використання альтернативних видів палива, як приклад тирси, значно заощаджує витрати на опалення. Для деревопереробних підприємств використання тирси є не тільки засобом утилізації відходів, але й заощадженням на палеві. Завдяки чому популярність переробки тирси зростає з року в рік, не тільки в промисловості, але і серед власників приватної власності.

Одним з раціональних способів утилізації і отримання якісного горючого газу з тирси є пароповітряна газифікація в псевдозрідженому шарі.

Метою роботи є підвищення якості отриманого горючого газу шляхом визначення основних умов проходження процесу, а саме – температурного режиму і співвідношення окисника - тирси.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Газифікація є одним з найбільш дешевих та екобезпечних способів отримання електричної та теплової

енергії. З екологічної точки зору головною перевагою газифікації твердого палива є низький рівень негативного впливу на навколишнє середовище. При газифікації відсоток палива, що не згорає, значно менший ніж при прямому спалюванні.

Процес газифікації залежить від ряду факторів – температури, складу суміші, що використовується для дуття, дисперсності палива, властивості його взаємодії з газами (реакційні властивості), згорання палива, плавлення золи, розподілення дуття, концентрація реагуючих речовин, стабільність режимів та ін.

Парокисневий газ утворюється при подачі в газогенератор кисню з додаванням пари. Пара вводиться для зниження температури в газогенераторі та отримання водню. При газифікації під високим тиском 2,0 – 2,5 МПа на парокисневому дутті отримують газ з великим вмістом метану та високою теплотвірною здатністю. Збільшення тиску сприяє утворенню великої кількості CH<sub>4</sub> та CН<sub>2</sub>.

В апаратах з псевдозрідженим (киплячим) шаром газифікація палива відбувається при значеннях температури, менших від температури плавлення золи, а також при сприятливих умовах для тепло- і масообміну (при практично постійній температурі по висоті шару) за рахунок інтенсивного перемішування. Сірка в шарі може зв'язуватись як золюю, так і вапном. Порівняно низьке значення температури процесу дозволяє зменшити викиди оксидів азоту, а також сприяє оптимальному сполученню сірки за рахунок додавання вапняку

(або доломіту). Установки з псевдозрідженим шаром працюють з сухим золовидаленням.

При газифікації дрібнодисперсних матеріалів виникають певні труднощі, оскільки шар палива чинить великий опір руху газів і виникає необхідність в підвищенні тиску дуття, внаслідок чого погіршується розподіл дуття, утворюється шлакування та великий винос дрібних частинок. Аналогічні незручності виникають в випадку розпадання палива при нагріванні [1, 2].

Значну проблему в процесах газифікації складає наявність конденсованого вуглецю, який зазвичай осідає в вигляді сажі на елементах установки для газифікації, внаслідок цього установка може вийти з ладу. З точки зору мінімізації утворення конденсованого вуглецю кращою вважається технологія з використанням водяної пари в якості одного з вихідних компонентів газифікації [3, 4].

Для отримання якісного генераторного газу з тирси необхідно встановити основні умови проходження процесу, а саме – температурний режим і співвідношення окисника - тирси.

### 3. Фізична модель процесу

Фізична модель процесу газифікації в псевдозрідженому шарі представлена на рис. 1 [5, 6].

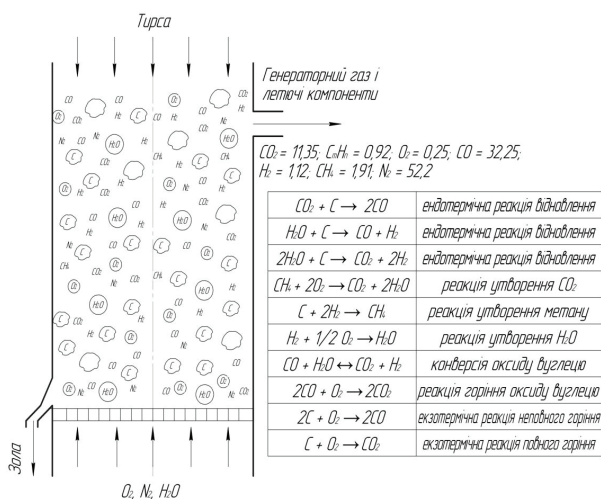


Рис. 1. Фізична модель пароповітряної газифікації тирси в псевдозрідженому шарі

При газифікації відбуваються процеси окислення, при якому утворюються  $CO$  і  $CO_2$ , та відновлення. При процесі окислення утворюється пароповітряний газ, за рахунок взаємодії кисню, пари та вуглецю палива. Якщо не враховувати наявність деякої кількості неосновних складових (азот, сірка, інертні гази), в паливі та окиснику, то процес утворення пароповітряного газу описується реакціями представленими на рис. 1.

Гетерогенні реакції можуть відбуватися як на зовнішній поверхні, так і в середині тіла завдяки порам, тріщинам та ін. Встановлено, що з підвищенням інтенсивності протікання гетерогенної реакції, тобто чим вище температура і чим більше реакційна здатність твердого тіла, тим в більшій степені ця реакція

зосереджується на його зовнішній поверхні. І навпаки, чим нижче температура і чим менша реакційна здатність твердого тіла, тим більше реакція проникає в середину [7].

В газогенераторах реакції окислення та відновлення відбуваються з великою швидкістю, тому можлива газифікація палива зі значною інтенсивністю. Необхідною умовою для цього є достатньо висока температура в апараті.

### 4. Математична модель ентальпії утворення та визначення температурного режиму і співвідношення паливо – окисник

Для розрахунків складу продуктів високотемпературної пароповітряної газифікації тирси була використана автоматизована система термодинамічних розрахунків ТЕРРА [8].

В основі методу розрахунків програми ТЕРРА лежить принцип максимуму ентропії, що відповідає другому закону термодинаміки для будь-якої рівноважної системи незалежно від шляху, по якому система досягла рівноваги.

$$S = \sum_{i=1}^k S_i^{(p_i)} \cdot n_i + \sum_{l=1}^L S_l \cdot n_l = \sum_{i=1}^k \left( S_i^0 - R_0 \ln \frac{R_0 T n_i}{v} \right) \cdot n_i + \sum_{l=1}^L S_l^0 \cdot n_l$$

де  $S_i^{(p_i)}$  – ентропія  $i$  – го компонента газової фази при тому парціальному тиску  $p_i = R_0 T n_i / v$ , який він буде мати в рівноважному стані;  $S_l$  – ентропія конденсованої фази  $l$ , що залежить тільки від температури;  $v$  – питомий об'єм всієї системи;  $S_i^0$  – стандартна ентропія  $i$  – го компонента газової фази при температурі  $T$  і тиску 1 фіз.атм.

$S_l$  – ентропія конденсованої фази  $l$ , що залежить тільки від температури;  $v$  – питомий об'єм всієї;  $S_i^0$  – стандартна ентропія  $i$ -го компоненту газової фази при температурі  $T$  та тиску, рівному 1 фіз.атм [8, 9].

Визначення параметрів рівноважного стану заключається в знаходженні значень всіх залежних змінних, включаючи числа молей компонентів і фаз, при яких величина ентропії досягає максимуму.

Розрахунок складу генераторного газу проводився в температурному режимі  $t=100-2100$  °C та тиску  $P=0,1$  мПа. Склад деревини, з якої утворено тирсу, приймався наступним: целюлоза (50%), лігнін (25%) та геміцелюлози (25%) [6].

Побудовано графік (рис. 2) залежності концентрацій компонентів утвореного газу від температури. З графіка видно, що в діапазоні температур 1100-2100 °C інтенсивність виділення газових компонентів майже незмінна, окрім цього, спостерігається максимальне виділення  $CO$ ,  $H_2$  і мінімальне  $CO_2$ . Тому область 1100-1300 °C є найбільш вірогідною для газифікації тирси.

Для загальної оцінки витрат енергії є необхідним визначення величин ентропій утворення компонентів реакцій, що відбуваються в процесі газифікації. Тому авторами статті був визначений підхід, що базується на використанні формули Д. И. Менделєєва [10] для розрахунку теплоти згорання речовин. Відповідно

до цієї формули, нижча теплота згорання речовини (враховуючи правило знаків, що приймається при термодинамічних розрахунках) дорівнює:

$$Q_{II} = -100 \cdot (81 \cdot C_C + 246 \times C_{H_2} - 26 \cdot C_{O_2} - 6 \cdot C_{H_2O}) \cdot 4,19, \text{ [кДж/кг]}.$$

де  $C_C, C_{H_2}, C_{O_2}, C_{H_2O}$  – масові долі атомів вуглецю, водню, кисню і води.

Виходячи з співвідношень для теплоти згорання:

$$Q_{II} = \Delta H^{вх.} - \Delta H^{вих.},$$

маємо

$$\Delta H^{вих.} = \Delta H^{вх.} - Q_{II},$$

де  $\Delta H^{вх.}$  – сума ентальпій вихідних речовин,  
 $\Delta H^{вих.}$  – сума ентальпій продуктів реакції.

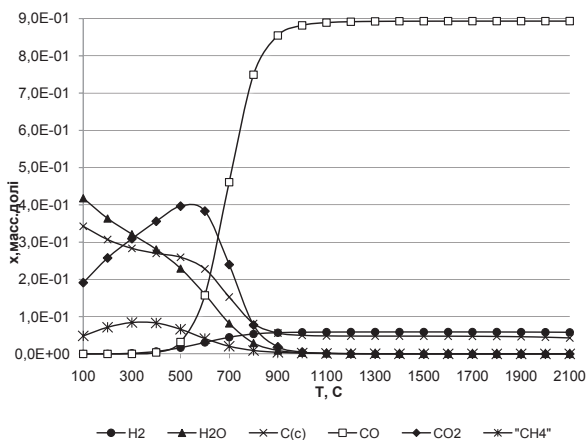


Рис. 2. Криві концентрацій H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, C(c), CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> при пароповітряній газифікації тирси в псевдозрідженому шарі (співвідношення тирси, O<sub>2</sub> та H<sub>2</sub>O – 4/2/3), залежність концентрації x, мас. долі, від температури T, °C

Таблиця 1

Дані процесу газифікації розраховані при температурі 1100 °C

Співвідношення деревина /O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	4/2/2	4/2/3	4/2/4	4/1/3	4/1/4
Кількість деревини на вході, кг/кмоль	634	634	634	634	634
Кількість O <sub>2</sub> на вході, кг/кмоль	32	32	32	16	16
Кількість H <sub>2</sub> O на вході, кг/кмоль	36	54	72	54	128
Витрати енергії, кДж/кг	3845	4167	3837	3834	3426
Витрати енергії, кВт/год	1,068	1,157	1,066	1,065	0,952
Кількість CO на виході, мас. долі	0,873	0,889	0,868	0,851	0,849
Кількість H <sub>2</sub> на виході, мас. долі	0,057	0,058	0,062	0,061	0,064
Сума кількості CO та H <sub>2</sub>	0,93	0,947	0,93	0,912	0,913

Дані процесу газифікації розраховані при температурі 1100 °C представлені в табл. 1.

Виходячи з результатів розрахунків можна зробити висновки, що при додаванні повітря в пароповітряну суміш витрати енергії збільшуються, але якість газу значно покращується. Збільшення концентрації пари в дутті, навпаки, погіршує показники якості газу, але підвищує ККД процесу. Тому співвідношення тирси, кисню та пари як 4/2/2 є найбільш раціональним при пароповітряній газифікації тирси в псевдозрідженому шарі.

### 5. Висновки

При температурах вище 1300 °C показники витрат окисника збільшуються, що негативно впливає як на якість отриманого генераторного газу, так і на ККД процесу. Тому газифікацію тирси слід проводити в діапазоні температур 1100-1300 °C.

Найбільш раціональне співвідношення тирси, кисню та пари – 4/2/2.

### Література

- Higman, C. Gasification [Текст] / C. Higman, M. Burht. – Elsevier Science, 2003. – 391с.
- Wiemer, A. W. Modeling a Low pressure steam-oxygen fluidized bed coal gasifying reactor chem [Текст] / A. W. Wiemer, D. E. Clough. // Eng. Sei – 1981. - №3 (36). – р.р. 549-567.
- Жовтянський, В.А. Стратегія енергозбереження в Україні: Аналітично – довідкові матеріали в 2-х томах: Загальні засади енергозбереження [Текст] / В. А. Жовтянський, М. М. Кулик, Б. С. Стогній. – К.: Академперіодика, 2006. – Т.1. – 510с.
- Rajan, R.R. A comprehensive model for fluidized bed coal combustors [Текст] / R.R. Rajan, C.Y. Wen. // AIChE Lj – 1980. - №4 (26). - р.р. 642-655.
- Канторович, В.Б. Основы теории горения и газификации твёрдого топлива [Текст] / В.Б. Канторович. – М: Металлургиздат, 1960. – 350 с.
- Basu, P. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory [Текст] / P. Basu. – Elsevier Science, 2010. – 376 с.
- Bukur, A. Amundson. Fluidized bed char combustion limited models [Текст] / A. Bukur // Chem. Eng. Sei – 1981. - №5. - р.р. 1239-1256.
- Трусов, Б.Г. Програмная система Тетга для моделирования фазовых и химических равновесий: труды XIV межд. Конф. по химической термодинамике [Текст] / Б.Г. Трусов. – М: СПб, 2002. – 483 с.
- Chen, T.P. Mathematical modeling of cold combustion in fluidized beds with sulphur emission control by limestone or dolomite [Текст] / T.P. Chen, S. C. Soxena. // Fuel, 1977. – v. 56. - р.р. 401-413.
- Равич, М.Б. Эффективность использования топлива [Текст] / М.Б. Равич. - М: Наука, 1977. – 344 с.