

Дослідження термохімічної конверсії органічних речовин у комбінованому газогенераторі

О. І. Брунеткін¹, доктор технічних наук, професор

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6701-8737>; e-mail: brunetkin@op.edu.ua;
https://www.researchgate.net/profile/Olexander_Brunetkin

Є. Г. Філіппов¹, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9034-176X>; e-mail: 10488154@stud.op.edu.ua

А. М. Іванєєв¹, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7618-3769>; e-mail: 10161115@stud.op.edu.ua

В. В. Тафій¹, студент магістратури

ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-6556-8964>; e-mail: n-nait@ukr.net

¹ Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У статті розглядається модель рівноважних хімічних процесів у комбінованому газогенераторі. Залежно від складу та вологості вихідної деревної сировини розраховуються параметри та склад газової суміші, що утворюється під час роботи комбінованого газогенератора запропонованої схеми. Порівняння результатів розрахунків з даними експериментальних досліджень показало, що запропонована модель адекватно відтворює перебіг процесів газифікації та піролізу.

Запропонована модель газифікації деревної сировини з використанням кисневого дуття дозволяє розширити перелік можливих хімічних реакцій, відкриває перспективу дослідження в єдиному методологічному підході до процесів горіння, піролізу та газифікації. В рамках цієї моделі можуть враховуватися різні окислювачі: повітря, кисень, пароповітряне, парокисневе та парове дуття, а також різні способи подачі додаткової зовнішньої енергії: через огорожувальні конструкції (теплообмінники) або разом з паровим дуттям.

Подальший розвиток та деталізація моделі призведе до збільшення кількості нелінійних алгебраїчних рівнянь, що описують хімічні процеси в комбінованому газогенераторі, відповідно, до ускладнення процедури їх розв'язання, але забезпечить більш повний та точний опис реальних процесів у комбінованих газогенераторах.

Ключові слова: термохімічна конверсія, органічна речовина, рівноважна модель, кисневе дуття, комбінований газогенератор.

Цитування статті: Брунеткін О. І., Філіппов Є. Г., Іванєєв А. М., Тафій В. В. (2026) Дослідження термохімічної конверсії органічних речовин у комбінованому газогенераторі. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 45(121), с.71-81. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.7>

Вступ

У найширшому сенсі під піролізом розуміють розкладання будь-яких сполук на складові менш важкі молекули або хімічні елементи під дією підвищеної температури. У широкому сенсі під піролізом розуміють високотемпературний термоліз органічних сполук. У вузькому сенсі — розкладання органічних природних сполук при відсутності або нестачі кисню (деревини, відхо-

дів сільськогосподарського виробництва, органічної частини побутових відходів, нафтопродуктів та іншого). Наявність в процесі піролізу обмеженої кількості кисню (перш за все в складі повітря) призводить до підвищеного виходу газової фази за рахунок зменшення вуглецевого залишку в процесі його газифікації або, навіть, до повної газифікації вихідних органічних речовин (за винятком їх мінеральної складової). Такі пристрої відносяться до газогенераторів.

© Брунеткін О. І., Філіппов Є. Г., Іванєєв А. М., Тафій В. В., 2026

Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

Додавання в процесі газогенерації в реакційну зону пари води призводить до збільшення в газовій фазі частки синтезу газу. Така газова суміш є привабливою з точки зору енергетичної цінності, з точки зору використання в якості вихідної сировини для хімічного синтезу, зручною для транспортування (трубопроводи), з позицій зменшення навантаження на навколишнє середовище внаслідок можливості переробки органічних відходів. Перераховані можливі позитивні сторони процесу газогенерації є основою для актуалізації розробки раціональних схем газогенераторів з наддувом киснем, повітрям або повітрям, збагаченим киснем.

1 Аналіз літературних даних і постановка проблеми

За час існування газогенераторів інтерес до їх застосування неодноразово відроджувався — в різні періоди і з різних причин.

Спочатку газогенератори створювалися для отримання горючих газів з деревини, деревного вугілля та низькоякісного палива, такого як торф. Отримані гази використовувалися як енергоносії в технологічних процесах і як паливо для перших двигунів внутрішнього згорання.

У наш час інтерес до технологій газифікації знову зростає. Цьому сприяють дві основні причини: по-перше, зростання споживання вуглеводневої сировини при одночасному скороченні її запасів і підвищенні цін; по-друге, швидке накопичення побутових і промислових відходів органічного походження. Газифікація таких відходів не тільки забезпечує додаткове отримання горючих газів і хімічної сировини, але й істотно знижує обсяг і шкідливість відходів.

За роки розвитку газогенераторів було створено безліч їх конструкцій. Кожна нова схема прагнула усунути недоліки попередніх, однак при цьому неминуче виникали й нові проблеми.

Процеси газифікації органічних речовин поділяються на дві основні групи:

1. газифікація в псевдозрідженому (киплячому) шарі;
2. газифікація у щільному шарі.

Установки з псевдозрідженим шаром [1] відрізняються значно більшою потужністю - вони здатні розвивати теплову продуктивність, що перевершує установки щільного шару десять і більше разів. Однак такі системи мають і суттєві недоліки. Одержуваний газ містить багато смол і золи, тому вимагає додаткового очищення. Крім того, до вихідної сировини висуваються суворі вимоги – необхідно забезпечити однаковий розмір частинок та низьку вологість.

Робота на знижених потужностях неможлива, оскільки підтримки киплячого шару потрібно постійний потік дуття певного обсягу. Конструкція установок складна, що потребує висококваліфікованого обслуговування. Також виникають логістичні труднощі: для установок потужністю 100 МВт і вище потрібна велика кількість сировини, і її доставка (наприклад, сільськогосподарських відходів) стає витратним та організаційно складним завданням.

Установки, що працюють за принципом газифікації в щільному шарі, зазвичай мають теплову потужність у межах 3–5 МВт, чого достатньо більшості виробничих потреб. Їх використання вирішує логістичні проблеми, оскільки потрібна менша кількість сировини. Ці пристрої з'явилися раніше за інші типи газогенераторів і відрізняються простотою конструкції та експлуатації.

Однак і вони мають недоліки. У газогенераторах (ГГ) щільного шару термічна конверсія органічних речовин відбувається у результаті трьох взаємозалежних процесів — піролізу, газифікації та горіння. Схеми роботи таких установок відрізняються напрямом руху сировини та продуктів реакції, а також послідовністю перебігу зазначених процесів.

Найбільш поширеним типом є газогенератор прямої дії. Він простий та надійний, стійкий до змін навантаження та здатний працювати на сировину з високою вологістю (до 60%). Завдяки цим перевагам такі генератори використовують і сьогодні [2].

Основним їх недоліком є зустрічний рух потоків: сировина подається зверху, а продукти газифікації рухаються знизу нагору. Це призводить до утворення великої кількості смол у верхній частині генератора де відбувається піроліз. Внаслідок цього одержуваний газ містить багато домішок, що робить його непридатним для транспортування та обмежує використання - він може спалюватися лише поблизу місця вироблення або вимагає дорогого очищення.

Іншим типом установок, що належать до групи газифікації в щільному шарі, є газогенератор зворотної дії [3]. У ньому протікають самі основні процеси — піроліз, горіння і відновлення, — але у іншому порядку. Сировина подається зверху і рухається вниз під дією сили тяжіння, а газоподібні продукти реакції спрямовуються в тому самому напрямку.

У верхній частині установки відбувається піроліз, у якому утворюється значна кількість смол. Потім продукти проходять через зони горіння та відновлення з високими температурами,

де смоли згоряють або розкладаються на прості з'єднання. Завдяки цьому вміст смол у кінцевому газі в десятки та сотні разів нижчий, ніж у газогенераторів прямої дії. Очищення газу або потребує мінімальних витрат, або зовсім не потрібне, що розширює можливості його використання.

Тим не менш, такі установки мають і недоліки. Їх конструкція складніша, ніж у генераторів прямої дії, а до вихідної сировини пред'являються підвищені вимоги — вологість не повинна перевищувати 25%. Крім того, газогенератори зворотної дії чутливі до зміни навантаження та мають нижчий коефіцієнт корисної дії.

З метою об'єднати переваги газогенераторів прямої та зворотної дії була розроблена схема газогенератора поперечного процесу [3]. Його основною перевагою є можливість роботи на малих потужностях. Однак через низьку ефективність і високий вміст смол в газі такі установки не отримали широкого застосування.

Враховуючи переваги та недоліки існуючих схем, у Фінляндії було запропоновано технологію газифікації "ENTIMOS" [4]. У ній використовується газогенератор прямої дії, але відбір горючих газів здійснюється із двох зон:

- після області горіння та газифікації, до зони піролізу, де вміст смол мінімальний;
- у верхній частині, після піролізу.

Такий підхід дозволяє отримувати частину газу з низьким вмістом смол, але при цьому обмежує можливість регулювання об'єму та складу газу. Крім того, при зміні властивостей вихідної сировини зміщуються межі відбору, що впливає на склад кінцевих продуктів.

Ідея, закладена в технології "ENTIMOS", використовується і в установках із киплячим шаром при двоступінчастій газифікації. Прикладом такої реалізації є газогенератори SilvaGas [5] і двоступінчастий газогенератор фірми Chogen [6]. Незважаючи на те, що цей підхід не повністю усуває недоліки газифікації в киплячому шарі, він відображає тенденцію до просторового поділу зон піролізу і горіння для підвищення якості одержуваного газу.

В [7] представлена схема комбінованого газогенератора, в якій об'єднані переваги установок щільного шару прямої дії. Така конструкція забезпечує можливість регулювання продуктивності у широкому діапазоні, допускає використання сировини з високою вологістю та не потребує ретельної фракційної підготовки.

Як і в зворотних газогенераторах, тут можна отримувати газ із низьким вмістом смол. При цьому, за аналогією з технологією SilvaGas, реалізовано принцип двоступінчастої газифікації -

зони піролізу і горіння розділені в просторі. Додатково передбачено рекуперацію тепла: частина енергії продуктового газу повертається в зону реакції. Однак у роботі [7] цю концепцію представлено лише як важлива схема, без практичної реалізації.

Підвищення за сучасних умов інтересу до використання ГГ за відсутності консенсусу щодо кращої схеми визначає актуальність подальшої розробки схем пристроїв газогенерації.

2 Мета та задачі дослідження

Метою даного дослідження є створення методу визначення складу газової суміші, що утворюється при роботі комбінованого газогенератора в залежності від складу і вологості вихідної сировини.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- побудувати модель процесу газогенерації в комбінованому газогенераторі при відомому складі вихідних вуглеводневих компонентів;
- розробити на основі цієї моделі методику розрахунку складу продуктів реакції у вигляді суміші газів.

3 Модель і метод дослідження

Схема установки (рис. 1) прийнята у вигляді, поданому в [7].

Принцип роботи газогенератора.

На рисунку 1 показано принципову схему газогенератора, запропонованого для розгляду. Конструкція корпусу включає дві взаємозалежні частини. У першій (позначеній як 1a) розміщується зона горіння і газифікації, а в другій (1b) — зона піролізу.

Вихідне паливо подається з бункера 2 через клапан 3 в зону піролізу. В процесі піролізу утворюються газоподібні продукти, які за допомогою вентилятора (димососа) 4 проходять через теплообмінник 5 і надходять в нижню частину зони 6 горіння і газифікації.

Подача окислювача може здійснюватися в різні області системи - ділянки 7 і 8 зони горіння і газифікації, а також в нижню частину зони піролізу (ділянка 9). Ці точки подачі є можливими варіантами, а чи не обов'язковими.

Гази, які утворюються у верхній частині зони газифікації 10, частково прямують назад у зону піролізу, де беруть участь у подальшому перебігу процесу. Решта газів проходить через теплообмінник 5 і виводиться через вихідний отвір 11 до споживача.

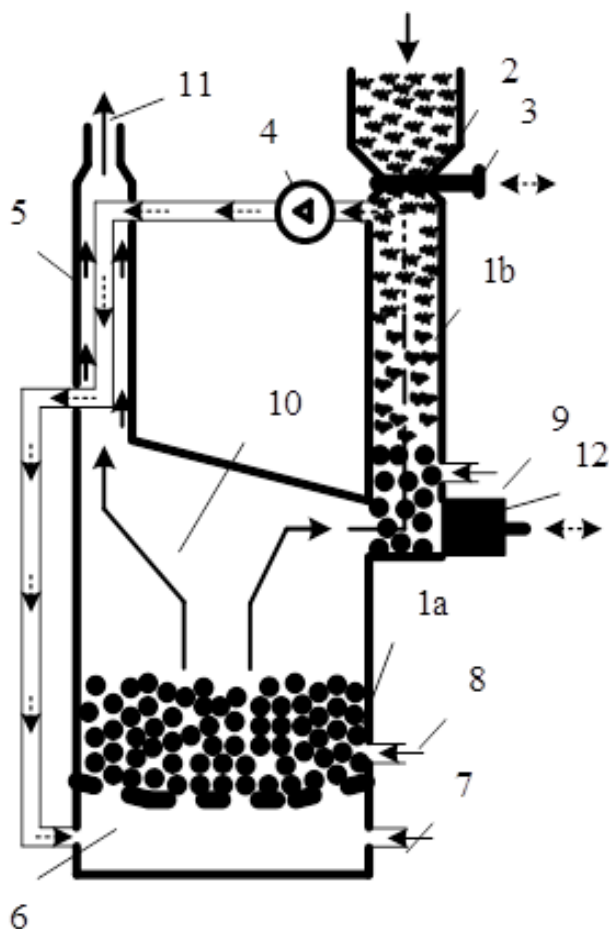


Рис. 1 - Принципова схема ГГ [7]

Розглянемо принцип роботи установки з прикладу використання деревних відходів як вихідної сировини.

Установка працює у заданому режимі. Висока температура деревного вугілля в зоні 1a підтримується різними способами:

- за рахунок його подальшого горіння при подачі окислювача через канал 8;
- за рахунок часткового спалювання (окислення) частини піролізних газів, які у зону 6, при подачі окислювача через канал 7, після чого продукти горіння проходять через шар вугілля;
- або з використанням комбінації цих двох способів.

У міру перетворення деревних відходів у вугілля (карбонізації) готове деревне вугілля нижнього сегмента 1b за допомогою механізму 12 переміщається в зону 1a. Одночасно з бункера 2 через клапан 3 здійснюється подача свіжих деревних відходів в піролізну частину 1b.

Управління процесом роботи газогенератора (ГГ) може виконуватися за рахунок:

- регулювання продуктивності димососа 4;
- зміни точки подачі окислювача (через 7, 8 або 9, їх поєднання) та обсягів окислювача, що подається;

- регулювання швидкості подачі вугілля з нижньої частини сегмента 1b в зону 1a, а також швидкості подачі вихідної сировини з бункера 2.
- Модель, метод дослідження описані у [8].

Особливості рішення.

Один з підходів до вирішення систем нелінійних алгебраїчних рівнянь полягає в їх лінеаризації та послідовному уточненні шуканих змінних. При лінеаризації необхідно обчислити похідні членів нелінійних виразів. У розробленій моделі передбачається, що концентрація парів вуглецевого залишку в процесі ітераційного пошуку наближеного рішення при фіксованій температурі залишається незмінною. Отже, її похідна дорівнює нулю. Ця особливість зберігається і для будь-яких інших речовин, що знаходяться в конденсованій фазі, якщо модель змінюється. Саме це відрізняє розрахунки, що виконуються на основі запропонованої моделі.

Методика розрахунку полягає в підборі такої температури і відповідного складу продуктів реакції, при яких сумарна ентальпія продуктів буде дорівнювати сумарній ентальпії вихідних компонентів — вихідного палива і окислювача. У літературних джерелах зазвичай наводяться значення ентальпії для газоподібних і рідких речовин. Однак для твердих горючих матеріалів, наприклад деревини різної вологості, замість ентальпії частіше вказують теплотворну здатність. У таких випадках ентальпію необхідно попередньо обчислити.

4 Визначення вихідних даних для розрахунку складу продуктів газогенерації

Хімічний склад горючої частини деревини різних порід в цілому мало відрізняється, тому при теплотехнічних розрахунках зазвичай використовують усереднені значення елементного складу: вуглець — 51%, водень — 6,1%, кисень — 42,3%, азот — 0,6%. Оскільки вміст азоту незначний, ним часто нехтують при наближених розрахунках.

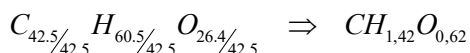
Виходячи з цих даних, можна представити органічну частину сухих соснових відходів (без урахування вологості) у вигляді узагальненої брутто-формули, що відображає співвідношення основних елементів.



При цьому ентальпія становить

$$I = - 6516 \text{ кДж/кг.}$$

Для спрощення подальших розрахунків вираз (1) можна представити в більш зручній формі:



При цьому молярна маса даного складу становить

$$\mu_c = 0,0233 \text{ кг/моль},$$

а ентальпія одного моля речовини дорівнює:

$$I_0 = -152,1 \text{ кДж/моль}.$$

Наведені дані стосуються абсолютно зневодненої деревини. Необхідно визначити склад (брутто-формулу) та ентальпію деревних відходів сосни при різних значеннях відносної вологості. В якості вихідного положення приймається визначення відносної вологості, що виражається через масу води та молярну масу абсолютно зневодненої деревини:

$$\varphi = \frac{x}{\mu_c + x}$$

де μ_c — молярна маса абсолютно сухої деревини сосни,

x — маса зв'язаної води.

З даного виразу впливає залежність:

$$x = \frac{\varphi}{1 - \varphi} \cdot \mu_c$$

Таблиця 1 - Брутто-формули та ентальпії деревини сосни різної вологості

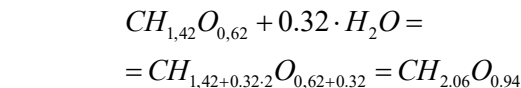
φ	0	0.2 (20%)	0.4 (40%)	0.6 (60%)
Брутто-формула	$CH_{1.42}O_{0.62}$	$CH_{2.06}O_{0.94}$	$CH_{3.15}O_{1.48}$	$CH_{5.3}O_{2.56}$
Ентальпія (кДж/моль)	-152.1	-243.6	-398.8	-706.6

У розрахунках, виконаних на основі моделі [8], крім врахування різних значень коефіцієнта надлишку окислювача α ($\alpha < 1$) і різних величин вологості φ , можливо також враховувати частину енергії, що повертається в зону реакції за рахунок теплообмінника (поз. 5 на рис. 1). Такий облік здійснюється за наступним алгоритмом.

Спочатку з усього складу продуктів газогенерації виділяються тільки газоподібні компоненти, виключаючи вуглецевий залишок. Для цієї газової суміші визначається ентальпія I_g при температурі процесу газогенерації. Потім для того ж складу обчислюється ентальпія I_{oc} при температурі навколишнього середовища, при цьому передбачається, що вода зберігається в пароподібному стані (аналогічно тому, як це враховується при визначенні нижньої теплотворної здатності палива).

Різниця $\Delta I = (I_g - I_{oc})$ характеризує максимальну можливу кількість енергії, яка може бути

Отримана при охолодженні газоподібної складової продуктів газогенерації. Певна частина цієї енергії (у відсотковому вираженні) додається до ентальпії вихідної речовини, що позначається як (8). Після цього в ітераційному процесі шукається рішення вихідної моделі.



Якщо прийняти табличне значення ентальпії води $I_w = -285,8$ кДж/моль, то ентальпія деревини при вологості 20% буде визначатися як сума ентальпії абсолютно сухої деревини та внеску, пов'язаного з водою, що міститься в ній:

$$I_{0.2} = I_0 + 0.32 \cdot I_w = -243.6 \text{ кДж / моль}$$

Розрахунки, виконані за цим алгоритмом, дозволяють визначити брутто-формули вологості деревини та відповідні значення її ентальпії при різних значеннях відносної вологості φ . Результати представлені в таблиці 1.

Якість газоподібної частини продуктів газогенерації, що отримуються при різних поєднаннях параметрів α , φ і ΔI , оцінюється за сумарною тепловою згоряння простих газів (за табличними даними), що входять до їх складу. При цьому важливо враховувати, що при зберіганні газогенераторного газу в газгольдерах або при його транспортуванні по трубопроводах гарячі продукти газогенерації, як правило, охолоджуються до температури навколишнього середовища. Вміщені в них пари води практично повністю конденсуються, тому при визначенні теплоти згоряння вони не враховуються. В результаті у складі залишаються тільки горючі гази — оксид

вуглецю (CO), водень (H₂), метан (CH₄) — а також вуглекислий газ (CO₂), який виступає як баласт. Співвідношення обсягів цих компонентів визначаються з результатів розрахунку складу продуктів газогенерації.

5 Аналіз результатів розрахунків

Адекватність отриманих розрахункових результатів оцінюється шляхом їх порівняння з даними експериментальних досліджень. Однак в області газифікації органічних речовин в літературі відзначається істотний розкид експериментальних даних різних авторів [9–10]. У зв'язку з цим представляє інтерес порівняти результати розрахунків з діапазонами варіювання експериментальних значень окремих характеристик процесу.

У роботі [9] наводиться характерне значення найнижчої теплотворної здатності піролізних газів у діапазоні 13–15 МДж/м³. Слід враховувати, що більшість експериментальних досліджень виконується на зразках деревини повітряно сухого стану ($\varphi = 0,15\text{--}0,2$) або кімнатно сухого ($\varphi = 0,08\text{--}0,1$). На рис. 2 представлені результати розрахунку найнижчої теплотворної здатності піролізних газів за використаною моделлю при різній вологості деревини. З аналізу отриманих залежностей випливає, що при вологості $\varphi = 0\text{--}0,2$ в діапазоні температур 800–900 К розрахункові значення добре узгоджуються з експериментальними даними. Зазначений інтервал температур у багатьох випадках є характерним для досліджень процесу повільного піролізу.

Зі збільшенням температури і вологості вихідної сировини зростає частка водню в складі піролізних газів. Водень характеризується високою гравіметричною теплотворною здатністю, проте його теплотворна здатність, віднесена до одиниці об'єму, відносно невелика. В результаті зростання об'ємної частки водню в суміші горючих газів призводить до зниження її об'ємної теплотворної здатності. Даний ефект також відображений в результатах розрахунків (рис. 2). При цьому слід зазначити, що загальний обсяг піролізних газів зростає за рахунок протікання реакцій конверсії парів води і вуглецевого залишку (деревного вугілля).

У роботі [10] зазначається, що ряд дослідників фіксують збільшення виходу газу і одночасне зниження його теплотворної здатності з ростом температури не тільки при піролізі (що підтверджується даними рис. 2), але і при газифікації. При більш високих температурах газифікації спостерігається зменшення кількості твердих частинок у продуктах, що узгоджується з інтенсифікацією діючих термохімічних перетворень.

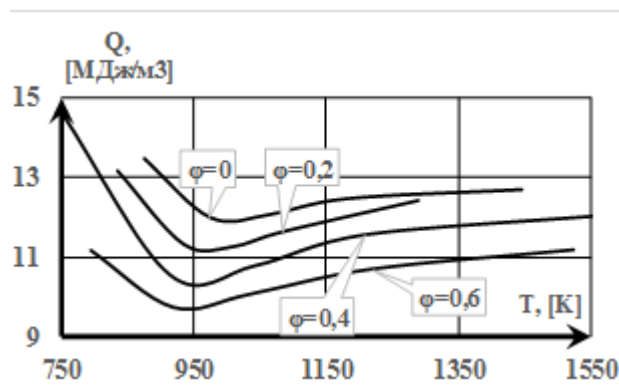


Рис. 2 - Найнижча теплотворна здатність піролізного газу в залежності від вологості деревини

Виконаний аналіз показав, що розглянутий ефект дійсно має місце, проте проявляється він лише за певних умов проведення процесу. Ймовірно, саме ці умови і мали місце в роботах тих дослідників, які експериментально зафіксували зазначене явище. Згідно з результатами розрахунків, зниження найнижчої теплотворної здатності генераторного газу спостерігається тільки в обмеженому діапазоні зміни температури в зоні реакції. При відсутності підведення зовнішньої енергії або при підведенні енергії постійної величини температура газифікації змінюється головним чином за рахунок зміни коефіцієнта надлишку окислювача α . При збільшенні α зростає і температура реакції. У зв'язку з цим коректніше говорити про залежність теплотворної здатності генераторного газу від коефіцієнта надлишку окислювача при певних умовах протікання реакції газифікації. На рис. 3 і 4 представлені результати розрахунків для випадку, коли зовнішнє підведення енергії відсутнє.

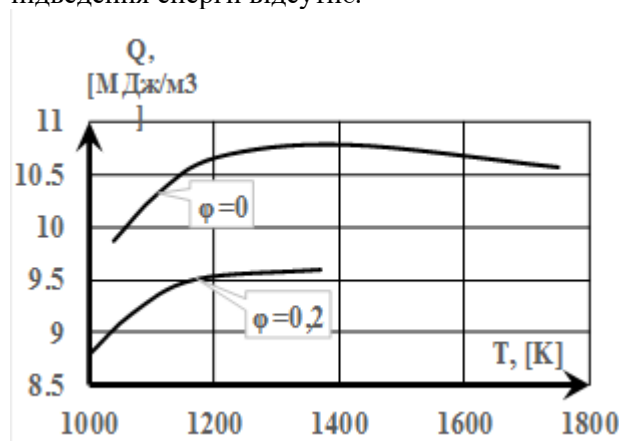


Рис. 3 - Залежність нижчої теплотворної здатності генераторного газу від температури в зоні реакції за відсутності зовнішнього підведення енергії

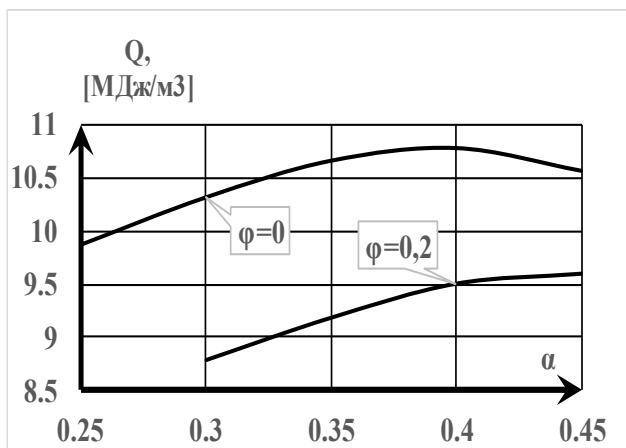


Рис. 4 - Залежність найнижчої теплотворної здатності генераторного газу від коефіцієнта надлишку окислювача в зоні реакції за відсутності зовнішнього підведення енергії

У цьому режимі нагрівання зони реакції забезпечується виключно за рахунок тепловиділення при окисленні частини вихідної сировини. На рис. 3 показана залежність нижчої теплотворної здатності генераторного газу від температури в зоні реакції, а на рис. 4 – від коефіцієнта надлишку окислювача.

З аналізу цих графіків випливає, що в розглянутих умовах із підвищенням температури в зоні реакції зниження теплотворної здатності газу можливе, зокрема, при переробці абсолютно сухої вихідної сировини.

На рис. 5 і 6 показані графіки зміни найнижчої теплотворної здатності генераторного газу для випадку, коли частина енергії додатково підводиться у внутрішню зону реакції, наприклад за допомогою теплообмінника 5 (рис. 1).

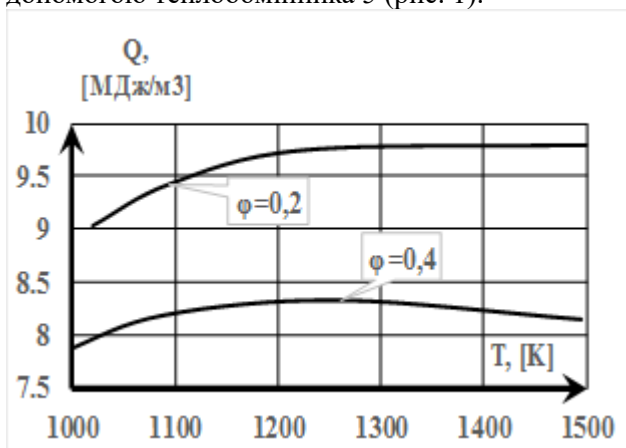


Рис. 5 – Зміна найнижчої теплотворної здатності палива залежно від температури в зоні реакції за наявності зовнішнього підведення енергії.

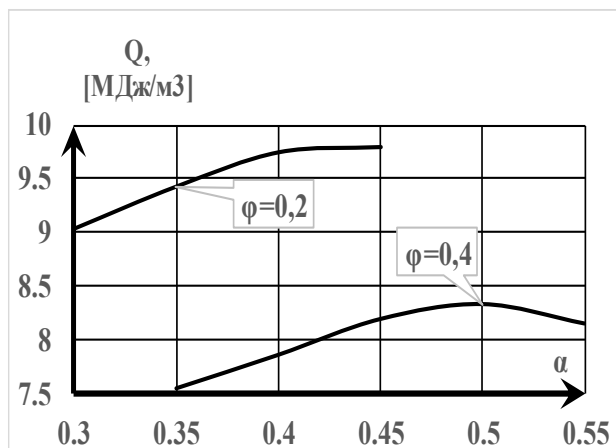


Рис. 6 – Зміна нижчої теплотворної здатності палива залежно від коефіцієнта надлишку окислювача в зоні реакції за наявності зовнішнього підведення енергії

У розглянутій схемі передбачається повернення в зону реакції 25% енергії газів 11 (рис. 1), що виходять з установки.

З аналізу графіків на рис. 5 і 6 видно, що за таких умов, у міру зростання температури в зоні реакції, зниження теплотворної здатності генераторного газу може мати місце при переробці вихідної сировини з високою вологістю ($\varphi = 0,4$).

Точне кількісне порівняння розрахованих за моделлю параметрів процесу газифікації з експериментальними даними ускладнене через значний розкид останніх. Так, у роботі [11], на основі огляду результатів ряду авторів, наводяться такі діапазони об'ємних концентрацій компонентів генераторного газу: для CO — 9–35 об.%; для H₂ — 2–35 об.%; для CH₄ — 1–5 об.%; для CO₂ — 9,5–15 об.%. У [10] (табл. 5) наведено склад генераторного газу при кисневому дутті і вказано його найнижчу теплотворну здатність, проте характеристики самого процесу не описані. Тому параметри, при яких отримано наведені там значення, можуть бути встановлені лише орієнтовно. Будемо виходити з припущення, що в роботі [10] розглядається процес газифікації без додаткового підведення енергії. Крім того, у багатьох дослідженнях вихідну сировину перед газифікацією попередньо сушать, тому далі приймаємо, що процес здійснюється для абсолютно сухої деревини сосни.

Оскільки кількість окислювача в [10] явно не вказана, розглянемо випадок коефіцієнта надлишку окислювача $\alpha = 0,35$. Для цих умов в табл. 2 наведено порівняння даних [10] з результатами розрахунку, виконаного за запропонованою моделлю.

Таблиця 2 – Склад продуктів газифікації при кисневому дутті

Джерело даних	Компоненти (% об'єма)					Q _{ниж} МДж/м ³
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	
[12]	32	48	15	2	3	10.4
Розрахунок	35.5	48.4	16.1	0	–	10.7

Розглянутому варіанту процесу відповідає розрахункова температура 1205 К (932 °С). Дані табл. 1 показують, що за зазначених умов значення, отримані експериментально, добре узгоджуються з результатами розрахунків. Відсутність N₂ в розрахункових даних пов'язана з прийнятою моделлю: через малий вміст азоту в вихідній сировині його присутність не враховувалася. Нульовий вміст метану пояснюється використанням рівноважної моделі. В рамках такої моделі передбачається, що всі можливі процеси термічної деструкції повністю завершені. У реальному експерименті час перебування газової суміші в реакційній зоні обмежений, тому розкладання вихідної органічної сировини може бути незавершеним. Поява метану в продуктах (що спостерігається в багатьох, хоча і не у всіх дослідках) якраз може служити індикатором неповного протікання процесів термічного розкладання.

У той же час розрахунки за рівноважною моделлю показують, що при певних комбінаціях параметрів процесу метан все ж може бути присутнім у продуктах піролізу і газогенерації.

Приклади таких розрахункових даних наведені в таблиці 3, де на відміну від таблиці 2, представлені значення концентрацій всіх компонентів газогенерації, що враховуються в розрахунках, включаючи водяну пару і вуглецевий залишок.

За умовами методу сумарна кількість газоподібних компонентів у кожному варіанті дорівнює одному молю. Ці газоподібні продукти спільно з вуглецевим залишком утворюються з певної кількості вихідної сировини, позначеної як M_T. Параметр ΔI характеризує частку енергії газоподібних продуктів реакції, яка через теплообмінник 5 (рис. 1) повертається назад у реакційну зону.

Таблиця 3 - Склад продуктів газогенерації

ΔI	φ	α	T, [K]	Кількість молей							Q _{ниж} МДж/м ³
				M _T	CO	CO ₂	CH ₄	C _{угл}	H ₂	H ₂ O	
0	0	0.25	1040	0.74	0.29	0.19	0.004	0.25	0.35	0.17	9.9
		0.3	1110	0.67	0.36	0.16	0.001	0.14	0.33	0.14	10.3
	0.4	0.35	900	0.45	0.05	0.25	0.007	0.15	0.24	0.45	7.3
		0.4	980	0.42	0.10	0.24	0.001	0.08	0.27	0.39	7.7
40%	0	0.2	1010	0.79	0.25	0.20	0.008	0.34	0.36	0.18	9.9
		0.25	1075	0.71	0.33	0.17	0.002	0.21	0.35	0.14	10.3
	0.4	0.35	940	0.44	0.07	0.24	0.004	0.12	0.27	0.41	7.7
		0.4	1010	0.41	0.11	0.24	0.001	0.06	0.28	0.37	8.0

6 Висновки та перспективи

1. В рамках використаної моделі рівноважних хімічних реакцій виконано розрахунок параметрів та складу газової суміші, що утворюється при роботі комбінованого газогенератора при різному складі та вологості вихідної деревної сировини.

Порівняння результатів розрахунку з даними експериментальних досліджень інших авторів показало, що запропонована модель адекватно відтворює перебіг процесів газифікації і піролізу.

Використання підходу, заснованого на рівноважних хімічних реакціях, дозволяє коректно застосовувати отримані результати для опису процесів, що повільно протікають.

Отримані результати доцільно розглядати як граничні, тобто такі, що характеризують максимально можливі значення параметрів системи.

2. Побудована модель газифікації деревної сировини з використанням кисневого дуття продемонструвала можливість запропонованого підходу.

Розширення переліку можливих хімічних реакцій відкриває перспективу дослідження у єдиному методичному підході процесів горіння, піролізу та газифікації.

В рамках цієї моделі можуть бути враховані різні окислювальні агенти, зокрема, повітряне, кисневе, пароповітряне, парокисневе та парове дуття. Також можуть бути враховані різні способи підведення додаткової зовнішньої енергії, наприклад, через огорожувальні конструкції (теплообмінники) або разом з паровим дуванням.

Подальший розвиток і деталізація моделі призведе до збільшення кількості рівнянь у системі нелінійних рівнянь алгебри і, відповідно, до ускладнення процедури їх вирішення, проте забезпечить більш повний і точний опис реальних процесів у комбінованих газогенераторах.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів стосовно цього дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на досліджен-

ня, а також на результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Усі дані доступні в числовій або графічній формі в основному тексті рукопису.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували технології штучного інтелекту під час створення цієї роботи.

Внесок авторів

О. І. Брунеткін: написання тексту – оригінальний чернетка, редагування, керівництво;
Є. Г. Філіппов: чисельні розрахунки;
А. М. Іванесв: чисельні розрахунки;
В. В. Тафій: чисельні розрахунки, адміністрування проєкту.

References

1. Hanchate, N., Ramani, S., Mathpati, C.S. and Dalvi, V.H. (2020). Biomass Gasification using Dual Fluidized Bed Gasification Systems: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 280(1), p.123148. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123148>.
2. Samylin, O., Tsyvenkova, N. and Golubenko, A. (2023). Suchasni enerhoefektyvni tekhnolohiyi vykorystannya vidkhodiv biomasy v sil's'komu, lisovomu ta komunal'nomu hospodarstvakh [Modern energy-efficient technologies for using biomass waste in agriculture, forestry and municipal services]. *Polissiauniver.edu.ua*. [online]. Available at: http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/2848/1/VZNAU_2009_1_269-278.pdf. [Accessed 20 Mar. 2026]
3. Tkachenko S.Y., Bodnar L.A. and Yuzyuk A.O. (2011). Perspektyvni napryamky vykorystannya biomasy yak dzherela enerhiyi [Promising directions of biomass use as an energy source]. [Text]. *Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu* [Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute], 2, pp. 68-73. Available at: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1396/1396>. [Accessed 20 Mar. 2026].
4. Esa Kurkela (2023). *Review of Finnish biomass gasification technologies*. [online] ResearchGate. Available at: https://www.researchgate.net/publication/30482338_Review_of_Finnish_biomass_gasification_technologies. [Accessed 20 Mar. 2026].
5. Sarkar, S., Kumar, A. and Sultana, A. (2011). Biofuels and biochemicals production from forest biomass in Western Canada. *Energy*, 36(10), pp.6251–6262. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.024>.
6. CHOREN Industrietechnik GmbH (2026). [online] Choren.com. Available at: <https://www.choren.com/en/technology/choren-coal-gasification/> [Accessed 20 Mar. 2026].
7. Brunetkin V.O. and Davidov V.O. (2023). Kombinovaniy sharoviy gazogenerator. [Combined Layer Gas Generator]. [online] The 22th International scientific and practical conference 'Modern theories and improvement of world methods'. Helsinki, Finland: International Science Group, pp.440–443. Available at: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.22> [Accessed 20 Mar. 2026].

8. Brunetkin, O., Maksymov, M.V., Maksymenko, A. and Maksymov, M.M. (2019). Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(6 (100)), pp.25–31. doi:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176422>.

9. Gintautas Bureika, Matijošius, J. and Rimkus, A. (2020). Alternative Carbonless Fuels for Internal Combustion Engines of Vehicles. *Lecture notes in networks and systems*, pp.1–49. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-42323-0_1.

10. Couto, N., Rouboa, A., Silva, V., Monteiro, E. and Bouziane, K. (2013). Influence of the Biomass Gasification Processes on the Final Composition of Syngas. *Energy Procedia*, 36, pp.596–606. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.068>.

11. Lyons Cerón, A., Konist, A., Lees, H. and Järvi, O. (2021). Effect of Woody Biomass Gasification Process Conditions on the Composition of the Producer Gas. *Sustainability*, [online] 13(21), p.11763. doi:<https://doi.org/10.3390/su132111763>.

Отримано (Received) 26.11.2025

Отримано після доопрацювання (Received after revision) 19.02.2026

Прийнято (Accepted) 20.03.2026

Опубліковано (Published) 23.04.2026

Study of Thermochemical Conversion of Organic Substances in a Combined Gas Generator

Olexander Brunetkin¹, *Doctor of Technical Sciences, Professor*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6701-8737>; e-mail: brunetkin@op.edu.ua;
https://www.researchgate.net/profile/Olexander_Brunetkin

Yevgen Filippov¹, *Postgraduate Student*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9034-176X>; e-mail: 10488154@stud.op.edu.ua

Andriy Ivaneev¹, *Postgraduate Student*

ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7618-3769>; e-mail: 10161115@stud.op.edu.ua

Vasyl Tafii¹, *Master's Student*

ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-6556-8964>; e-mail: n-nait@ukr.net

¹ *Odessa Polytechnic National University*

Abstract. *The article considers a model of equilibrium chemical processes in a combined gas generator. Depending on the composition and humidity of the initial wood raw material, the parameters and composition of the gas mixture formed during the operation of the combined gas generator of the proposed scheme are calculated.*

Comparison of the calculation results with the data of experimental studies showed that the proposed model adequately reproduces the course of the gasification and pyrolysis processes.

The proposed model of gasification of wood raw materials using oxygen blast allows you to expand the list of possible chemical reactions, opens up the prospect of research in a single methodological approach to the processes of combustion, pyrolysis and gasification. Within the framework of this model, various oxidants can be taken into account: air, oxygen, steam-air, steam-oxygen and evaporation, as well as various methods of supplying additional external energy: through enclosing structures (heat exchangers) or together with a steam blast.

Further development and detailing of the model will lead to an increase in the number of nonlinear algebraic equations describing chemical processes in a combined gas generator, respectively, to a complication of the procedure for their solution, but will provide a more complete and accurate description of real processes in combined gas generators.

Keywords: *thermochemical conversion, organic matter, equilibrium model, oxygen blowing, combined gas generator.*

Article citation: Brunetkin O. I., Filippov E. G., Ivaneev A. M., Tafiy V. V. (2026) Research on thermochemical conversion of organic substances in a combined gas generator. *Electrotechnic and Computer Systems*, 45(121), pp.71-81. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.7>

Про авторів (About the authors)



Брунеткін Олександр Іванович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: brunetkin@op.edu.ua; тел.: +380 50 299 4232

Olexander Brunetkin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Software and Computer-Integration Technology, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine.
E-mail: brunetkin@op.edu.ua; ph.: +380 50 299 4232

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6701-8737>
https://www.researchgate.net/profile/Olexander_Brunetkin



Філіппов Євген Геннадійович, аспірант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: 10488154@stud.op.edu.ua; тел.: +380 67 716 1160

Yevgen Filippov, Postgraduate Student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine.
E-mail: 10488154@stud.op.edu.ua; ph.: +380 67 716 1160

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9034-176X>



Іванєєв Андрій Миколайович, аспірант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: 10161115@stud.op.edu.ua; тел.: +380 97 705 5396

Andriy Ivaneev, Postgraduate Student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: 10161115@stud.op.edu.ua; ph.: +380 97 705 5396

ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7618-3769>



Тафій Василь Васильович, магістрант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: n-nait@ukr.net; тел.: +380 97 299 8623

Vasyl Tafii, Master's Student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine.
E-mail: n-nait@ukr.net; ph.: +380 97 299 8623

ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-6556-8964>