

## REVISITED THE MODELLING OF UNDERGROUND GASIFIER SYSTEM

Saik Pavlo<sup>1\*</sup>, Dychkovskiy Roman<sup>1</sup>, Lozynskiy Vasyl<sup>1</sup>, Falshtynskiy Volodymyr<sup>1</sup>  
Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine  
\*Corresponding author: e-mail [saik.nmu@gmail.com](mailto:saik.nmu@gmail.com)

**Abstract.** This article highlights the main aspects of the implementation of qualitatively new approaches to technologies of thermochemical conversion of carbon-containing raw materials during underground coal gasification. With the transformation of the connection “mining company → public utility company” with one direction of production processes, utilities also become a supplier of energy raw materials. When modeling an underground gasifier system, rational principles and tolerances in their construction make it possible to establish the basic patterns of processes, as well as to neglect the secondary factors influencing its formation. Establishing thermodynamic composition and properties of complex heterogeneous, multi-element, multiphase systems in a wide range of temperatures and pressures, considering chemical and phase transformations, can be predicted in several ways. Determining the function of temperature change ( $T$ ) from the ratio of blast mixture and raw material ( $k_m$ ) based on thermodynamic calculation in zero-dimensional formulation allows to substantiate the parameters of thermal field propagation around the underground gasifier by the length of the combustion face and the length of the extraction column.

**Keywords:** underground gasification, gasifier, coal, zero-dimensional problem statement, thermodynamic parameters

## ДО ПИТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПІДЗЕМНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА

Саїк Павло<sup>1\*</sup>, Дичковський Роман<sup>1</sup>, Лозинський Василь<sup>1</sup>, Фальштинський Володимир<sup>1</sup>  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна  
\*Відповідальний автор: e-mail [saik.nmu@gmail.com](mailto:saik.nmu@gmail.com)

**Анотація.** У даній статті висвітлені основні аспекти впровадження якісно нових підходів щодо технологій термохімічного перетворення вуглецевмісної сировини, зокрема підземної газифікації вугілля. При трансформації зв'язку «гірничодобувне підприємство → комунальне господарство» з однією направленістю виробних процесів комунальне господарство також стає постачальником енергетичної сировини. При моделюванні системи підземного газогенератора раціональні принципи та допуски при їх побудові дають можливість встановити основні закономірності процесів, а також знехтувати другорядними факторами, що впливають на її формування. Закладення термодинамічних характеристик в нульмерну постановку задачі при моделюванні системи підземного газогенератора дозволяє кількісно спрогнозувати склад та властивості складних гетерогенних, багатоеlementних, мультифазних систем в широкому діапазоні температур та тисків з урахуванням хімічних і фазових перетворень. Визначення функції зміни температури ( $T$ ) від співвідношення дуттьової суміші та вихідної сировини ( $k_m$ ) на основі проведення термодинамічного розрахунку в нульмерній постановці дозволяє обґрунтувати параметри розповсюдження теплового поля навколо підземного газогенератора як за довжиною вогневого вибою, так і за довжиною виймального стовпа.

**Ключові слова:** підземна газифікація, газогенератора, вугілля, нульмерна постановка задачі, термодинамічні параметри

**Вступ.** Ідея формування замкнених систем при використанні технологій термохімічного перетворення вуглецевмісної сировини [1] та різнотипних відходів є не новою [2, 3], але утворення єдиної системи газогенератора на базі даних технологій є якісно новим підходом при впровадженні технологій термохімічного перетворення [4]. Основний принцип, який повинен закладатися з технологічного погляду, – це безперервне функціонування системи.

Одним із яскравих принципів роботи такої системи є когенераційне виробництво енергоносіїв на базі підземної газифікації вугілля [5], систем акумуляції й енерго-біологічної переробки [6]. При цьому утилізація різнотипних відходів, зокрема відходів органічного вмісту, реалізується на комбінованих комплексах, що в своєму складі мають високотемпературні ланки утилізації та очищення.

Для побудови єдиної системи газогенератора, що включатиме як газифікацію вугілля, так і газифікацію різнотипних вуглецевмісних відходів необхідно розробити модель формування цієї системи, що буде відображати її основні процеси та сутність необхідних техніко-технологічних удосконалень [7, 8]. Основні принципи, що закладаються в основу побудови моделі єдиної системи газогенератора можна об'єднати за деякими спільними характерними ознаками:

- наявність необхідного джерела перетворення та відповідного технічного забезпечення;
- визначення попиту на необхідну хімічну та енергетичну продукції, виходячи з потреб вітчизняного та світового ринків;
- використання ресурсного, технологічного та організаційного потенціалу підприємств, пов'язаних з експлуатацією та розробкою вуглецевмісної сировини (перевага надається вугільним шахтам, що закінчують свій термін експлуатації);
- залучення об'єктів комунального господарства до ефективної утилізації вуглецевмісних відходів;
- досягнення спільної взаємодії паливно-енергетичних та комунальних господарств для повнофакторного залучення сировини та використання отриманих ресурсів зі збереження екологічних компонент.

Побудова моделі єдиної системи газогенератора дозволяє виявити нові підходи у формуванні технологічних схем для окремих гірничодобувних регіонів із залученням у їх діяльність об'єктів комунального господарства. Відбувається трансформація зв'язку «гірничо-добувне підприємство → комунальне господарство» з однією направленістю виробних процесів. На зміну приходить система «гірничо-добувне підприємство ↔ комунальне господарство», в якій комунальне господарство також стає постачальником енергетичної сировини. Структура формування такої моделі наведена на рис. 1.

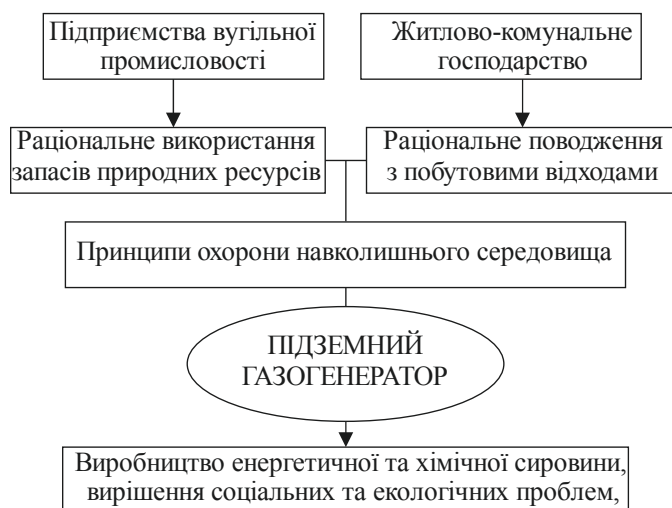


Рис. 1. Модель формування єдиної системи газогенератора

Створення та розробка нової моделі підприємства або вдосконалення уже існуючої пов'язана з низкою вирішення складних технологічних задач та можливістю їх адаптації в різних умовах функціонування підприємства. Модель є складовою частиною наукового світосприйняття досліджуваного об'єкту, що дозволяє, згрупувавши спільні ознаки даного об'єкту, відобразити його статистичні та динамічні показники.

Перед формуванням моделі газогенератора необхідно провести оцінку основних принципів та допусків, що будуть обґрунтовувати її адекватність. Рациональні принципи та

допуски при побудові моделей дають можливість встановити основні закономірності процесів, що характерні даній моделі, при цьому можна знехтувати другорядними факторами, що впливають на її формування. У наукових дослідженнях прийнято розрізняти методи математичного та фізичного моделювання, в основу яких закладено принципи фізичної чи математичної подібності [9-11].

Отже метою даної роботи є обґрунтування термодинамічних параметрів для побудови розрахункової комп'ютерної моделі системи підземного газогенератора в нульмерній постановці.

**Методика проведення досліджень.** В основу побудови розрахункової комп'ютерної моделі системи підземного газогенератора закладені зміни її термодинамічних параметрів. Водночас враховується їх зміна за довжиною вогневого вибою і за часом у заданому об'ємі, де відбувається термічна деструкція різнотипних вуглецевмісних відходів. Побудова даної моделі здійснюється на основі нульмерного термодинамічного розрахунку.

Задаючи геометричні параметри досліджуваної області вільним об'ємом, а швидкість посування вогневого вибою залежно від типу дуттьової суміші, можливо виконати розбиття геометричної моделі на характерні ділянки. Дані ділянки відповідають характерному часу термічної деструкції вуглецевмісної сировини. Таким чином, виконується розбиття розрахункової моделі за довжиною, де на кожній з ділянок визначається площа поверхні горіння вугілля, прохідний переріз у вільному об'ємі горіння і їх зміна залежно від об'єму вуглецевмісної сировини, що розкладається. Розрахункова сітка наведена на рис.2.

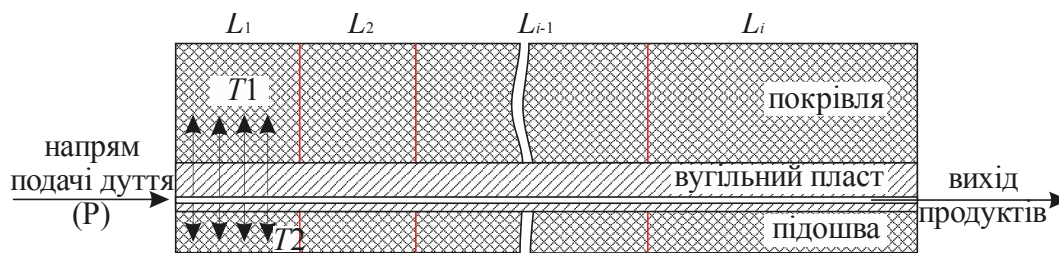


Рис. 2. Розрахункова сітка з визначення основних перерізів досліджуваної області

Об'єм досліджуваної області ( $V$ ), ентропія ( $S$ ), внутрішня енергія ( $U$ ), ентальпія ( $H$ ), енергія Гельмгольца ( $F$ ), енергія Гіббса ( $G$ ) є екстенсивними термодинамічними параметрами системи, тобто пропорційними масі речовини, що розкладається в системі. А тиск ( $p$ ), термодинамічна температура ( $T$ ), концентрація, мольні та питомі термодинамічні величини інтенсивними термодинамічними параметрами, що не залежать від маси речовини в системі [12].

#### **Виклад основного матеріалу.**

Загальновідомо, що внутрішня енергія тіла складається з кінетичної енергії теплового руху частинок (атомів та молекул) в їх хаотичному русі відносно центру мас тіла і загальної потенційної енергії їх зв'язку. Водночас зміна внутрішньої енергії тіла є певна функція параметрів стану, наприклад температури ( $T$ ), об'єму ( $V$ ) та тиску ( $P$ ) [13]:

$$U = f(T, V, P)$$

Закон збереження енергії для неізольованої закритої системи в загальному випадку виражається рівнянням:

$$dQ = dU + dE + dL^{(e)}$$

де  $dQ$  – підведена ззовні теплота до досліджуваної системи;

$dU$  – приріст внутрішньої енергії системи;

$dE$  – приріст кінетичної енергії системи в її макроскопічному русі;

$dL^{(e)}$  – елементарна робота, що здійснюються системою над зовнішніми тілами (проти зовнішніх сил)

У розглянутих термодинамікою квазістатичних процесах прискореннями частинок в їх макроскопічному русі нехтують і приймають  $dE = 0$ . У цьому випадку закон збереження енергії називається першим початком термодинаміки і записується у вигляді:

$$dQ = dU + dL^{(e)}$$

При відсутності масових сил та силових полів  $dL^{(e)}$  представляє собою елементарну роботу розширення газу, що дорівнює  $PdV$ . У цьому випадку перший закон термодинаміки записуватиметься таким чином:

$$dQ = dU + PdV$$

Щоб підкреслити, що  $dQ$  не є повним диференціалом, часто пишуть  $\delta Q$ .

Термодинамічний процес переходу системи зі стану (1) в стан (2) називається оборотним, якщо можливий зворотний перехід системи зі стану (2) в стан (1) тим самим шляхом, але в зворотному напрямку, без будь-яких змін у зовнішньому середовищі [14].

Ентропія ( $S$ ) – введена Клаузиусом функція стану, яка визначається в елементарному оборотному процесі диференціальною залежністю [15]:

$$dS > \frac{dQ}{T}$$

Кінцевий приріст ентропії в оборотному процесі відповідно буде представлено у такому вигляді:

$$S_{(2)} - S_{(1)} = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \int_1^2 \left( \frac{dU}{T} + \frac{P}{T} dV \right)$$

Цей приріст ентропії зумовлений тільки зовнішнім приростом теплоти. Коли система віддає теплоту ( $dQ < 0$ ), її ентропія зменшується. Існування ентропії як функції стану системи слід розглядати як постулат.

Другий закон термодинаміки полягає в твердженні, що при будь-яких необоротних процесах в закритій системі приріст ентропії системи завжди більше приросту ентропії внаслідок зовнішнього припливу тепла. З даного твердження випливає, що при незворотних процесах (наприклад, при нерівних хімічних реакціях, явищах теплопровідності, тертя, дифузії) відбувається необоротне зростання ентропії, яке виражається завжди позитивною різницею:

$$dS_{\text{внутр.}} \equiv dS - \frac{dQ}{T} > 0.$$

Таким чином, з другого закону термодинаміки випливає, що ніяким теплообміном роботою з зовнішнім середовищем не можна компенсувати зростання ентропії при будь-яких необоротних процесах в закритій системі. Величину  $dQ' = TdS_{\text{внутр.}}$  Клазіус назвав некомпенсованою теплотою [15, 16]. Необхідно відмітити, що дана теплота є некомпенсованою зворотними процесами. Тоді перше і друге начало термодинаміки можна виразити одним рівнянням:

$$dU = TdS - PdV - dQ'$$

де  $dQ' \geq 0$ , а в зворотних процесах  $dQ' = 0$ .

Дослідження геореакторної системи включає в себе розгляд деякої кількості речовини масою ( $m$ ), об'єм ( $V$ ), ентропію ( $S$ ) і температуру ( $T$ ) при тиску ( $P$ ). Ентальпія ( $I$ ), енергія Гіббса ( $G$ ) і вільна енергія ( $F$ ) описується рівняннями:

$$I = U + PV,$$

$$F = U + TS,$$

$$G = I + TS.$$

Функції ( $F$ ) та ( $G$ ) називають ізохорно-ізотермічним та ізобарно-ізотермічним потенціалами відповідно [16]. В зворотних процесах зміна внутрішньої енергії ( $U$ ), ентальпії ( $I$ ) потенціалів ( $F$ ,  $G$ ) в закритій системі виражають :

$$dU = TdS - PdV,$$

$$dI = TdS + VdP,$$

$$dF = -SdT - PdV,$$

$$dG = -SdT + VdP.$$

Термодинамічні функції  $U(S, V)$ ,  $I(S, P)$ ,  $F(T, V)$ ,  $G(T, p)$ , як функції зазначених аргументів називаються характеристичними функціями, знаючи одну з них, можна виразити всі інші, застосовуючи операції диференціювання.

В незворотних процесах вищенаведені нерівності можна виразити:

$$dU = TdS - PdV - dQ',$$

$$dI = TdS + VdP - dQ',$$

$$dF = -SdT - PdV - dQ',$$

$$dG = -SdT + VdP - dQ'.$$

де  $dQ' \geq 0$ , а при рівновазі  $dQ' = 0$ .

Звідси, критерії можливості самовільного процесу в замкнутій системі до моменту досягнення рівноваги і критерії рівноваги можна представити у вигляді табл. 1.

Таблиця 1 – Загальні умови можливості мимовільних процесів в закритій системі

Умови процесу	Критерій можливості самовільного процесу	Критерій рівноваги
$U = const, V = const$	$dS > 0$	максимум $S$
$I = const, P = const$	$dS > 0$	максимум $S$
$T = const, V = const$	$dF < 0$	максимум $F$
$T = const, P = const$	$dG < 0$	максимум $G$
$S = const, V = const$	$dU < 0$	максимум $U$
$S = const, P = const$	$dI > 0$	максимум $I$

**Висновки.** Послідовність побудови комп'ютерної моделі системи підземного газогенератора та дослідження її основних геометричних та фізичних параметрів повинна проводитись таким чином:

1. Задання вихідних даних:

- умовна формула сировини, що підлягає термічній деструкції та дуттьової суміші, і ентальпія їх утворення.

- геометричні параметри вільного об'єму (каналу), де відбувається газифікація;

2. Визначення функції зміни температури ( $T$ ) від співвідношення дуттьової суміші та вихідної сировини ( $k_m$ ) на основі проведення термодинамічного розрахунку в нульмерній постановці  $T = f(k_m)$ .

3. Визначення співвідношення компонентів дуттьової суміші та вихідної сировини ( $k_m$ ).

4. Визначення витрат сировини, що підлягає термічній деструкції на першій ділянці досліджуваної області (рис. 2), задаючи начальну температуру при якій відбувається займання сировини.

5. Визначення температурного режиму у вогневому каналі та часу газифікації сировини для кожної наступної ділянки за довжиною  $L_1, L_2, L_{i-1}, L_i$ .

**Вдячність.** Дана робота виконана в рамках проведення наукових робіт та науково-технічних (експериментальних) розробок молодих учених «Синтез, оптимізація та параметризація інноваційних технологій освоєння ресурсів газовугільних родовищ» при підтримці Міністерства освіти і науки України (№держреєстрації 0119U000248).

## References

1. Stepanovich, D., Yokhannssen, S., & Pritsher, R. (2014). Patent UA 107196.
2. Lysenko, I.S., Sihal, I.Ia., Zhuk, H.V., Sribniak, S.V., Sihal, O.I. (2012). Ustanovka termichnoi utylizatsii tverdykh pobutovykh, promyslovykh ta budivelnykh vidkhodiv. *Energotehnologii i resursosberezhenie*, (1), 72-75.
3. Zhovtyanskiy, V.A. (2018). Pererabotka uglerodsoderzhaschih othodov, vklyuchayuschih opasnyie i radioaktivnyie komponentyi. *Ekologiya i promyishlennost*, (3-4), 73-85.
4. Falshtynskiy, V.S., Dychkovskiy, R.O., Saik, P.B., Lozynskiy, V.H., & Cabana, E.C. (2017). Formation of thermal fields by the energy-chemical complex of coal gasification. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 36-42.
5. Tabachenko, N., Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., & Saik, P. (2011). Cogeneration gas utilization of borehole coal seams gasification on traditional power station. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 34-41.
6. Tabachenko, N., Samusia, V., Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., & Oksen, Yu. (2012). Novitni pryntsyipy teplonasosnykh ta koheneratsiinykh tekhnolohii vykorystannia vykydnoho tepla. D.: National Mining University.
7. Tabachenko, M., Saik, P., Lozynskiy, V., Falshtynskiy, V., & Dychkovskiy R. (2016). Features of setting up a complex, combined and zero-waste gasifier plant. *Mining of Mineral Deposits*, 10(3), 37-45. <http://dx.doi.org/10.15407/mining10.03.037>
8. Saik, P., Petlevanyi, M., Lozynskiy, V., Sai, K., & Merzlikin, A. (2018). Innovative approach to the integrated use of energy resources of underground coal gasification. *Solid State Phenomena*, (277), 221-231. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.221>
9. Pivnyak, G., Dychkovskiy, R., Bobyliov, O., Cabana, E. C., & Smoliński, A. (2018). Mathematical and Geomechanical Model in Physical and Chemical Processes of Underground Coal Gasification. *Solid State Phenomena*, (277), 1-16. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.277.1>
10. Rosen, M. A., Reddy, B. V., & Self, S. J. (2018). Underground coal gasification (UCG) modeling and analysis. *Underground Coal Gasification and Combustion*, 329-362. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100313-8.00011-6>
11. Ranade, V., Mahajani, S., & Samdani, G. (2019). Kinetics of Coal Gasification. *Computational Modeling of Underground Coal Gasification*, 79-119.
12. Pupyishev, A.A. (2007). Termodinamicheskoe modelirovanie termohimicheskikh protsessov v spektralnykh istochnikah. Ekaterinburg: Uralskiy gosudarstvenniy tehnikeskii universitet.
13. Sivuhin, D.V. (1990). Obschiy kurs fiziki. Termodinamika i molekulyarnaya fizika. T. II. M.: Nauka.
14. Prykhodko, M.F., & Herasymov, H.H. (2008). Termodinamika ta teploperedacha. Rivne: National University of Water and Environmental Engineering.
15. Clausius, R. (1879). Mechanical theory of heat. Translated by Walter E. Browne. London: Macmillan and Co.
16. Kudinov V.A. (2018). Tehnicheskaya termodinamika i teploperedacha. M.: Litres.