



УДК 681.54

DETERMINATION OF THE GROSS FORMULA OF SOLID WASTE AS A MIXTURE OF HOUSEHOLD PLASTICS**ВИЗНАЧЕННЯ БРУТТО-ФОРМУЛИ ТВЕРДИХ ВІДХОДІВ ЯК СУМІШІ ПОБУТОВИХ ПЛАСТИКІВ****Zyma I.V. / Зима І.В.**

*PhD student of the Department of Software and Computer-integrated technologies /
аспірант кафедри програмних та комп'ютерно-інтегрованих технологій*
ORCID: 0009-0009-8745-8543

Kipriianov I.A. / Кіпріяннов І.А.

*PhD student of the Department of Software and Computer-integrated technologies /
аспірант кафедри програмних та комп'ютерно-інтегрованих технологій*
ORCID: 0009-0004-3128-5704

Ivaneiev A.M. / Іванєєв А.М.

*PhD student of the Department of Software and Computer-integrated technologies /
аспірант кафедри програмних та комп'ютерно-інтегрованих технологій*
ORCID: 0009-0001-7618-3769

Filipov Y.H. / Філіпов Є.Г.

*PhD student of the Department of Software and Computer-integrated technologies /
аспірант кафедри програмних та комп'ютерно-інтегрованих технологій*
ORCID: 0000-0002-9034-176X

*Odesa Polytechnic National University, Odesa, Shevchenko Avenue, 1, 65044
Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, пр. Шевченка, 1, 65044*

Анотація. Робота присвячена визначенню брутто-формули суміші пластикових відходів, що складаються з основних типів побутових пластиків, таких як поліетилен, поліпропілен, полістирол, полівінілхлорид та поліетилентерефталат. Метою дослідження є створення основи для подальших розрахунків і моделювання термічних та хімічних процесів переробки пластикових відходів, зокрема піролізу та газифікації. Визначення брутто-формули дозволяє оцінити елементний склад суміші та її енергетичні характеристики, враховуючи вплив вологості. Встановлено, що зі збільшенням вологості змінюється вміст водню та кисню, що впливає на енергетичну ефективність переробки. Зокрема, підвищення вологості призводить до зниження енергетичної цінності суміші через додаткові витрати енергії на випаровування води. Результати дослідження можуть бути використані для удосконалення методів переробки пластикових відходів, оптимізації енергетичних показників установок і зниження негативного впливу на навколишнє середовище. Окрім того, розробка автоматизованих систем для контролю та управління процесами переробки дозволить підвищити ефективність і зменшити людський фактор у цих процесах.

Ключові слова: брутто-формула, пластикові відходи, переробка, вологість, енергетичні характеристики, автоматизація.

Вступ.

Проблема переробки твердих побутових відходів, зокрема пластикових, стає все більш актуальною через постійне зростання їх обсягів та значний негативний вплив на довкілля. Неправильне поводження з цими відходами призводить до забруднення навколишнього середовища, а також втрати цінних ресурсів, які могли б бути повторно використані. В умовах постійного зростання кількості пластикових відходів та обмежених можливостей їх утилізації, зростає необхідність розробки ефективних методів переробки з



мінімізацією впливу на екосистему.

Головною метою цієї роботи є визначення властивостей суміші побутових пластикових відходів шляхом встановлення їх брутто-формули. Це дозволить створити основу для подальших досліджень і розрахунків термічних та хімічних процесів переробки, таких як піроліз або газифікація. Визначення брутто-формули суміші пластикових відходів є важливим етапом, що сприяє ефективному управлінню процесами переробки та оцінці потенціалу отримання вторинних енергоресурсів.

Основний текст

Хімічний склад пластмас у побутових відходах

Кожен тип пластмаси має свою специфічну брутто-формулу, яка визначає його хімічний склад. Для прикладу, формули для деяких основних пластиків, що містяться в побутових відходах, такі:

- Поліетилен (PE): C_2H_4
- Поліпропілен (PP): C_3H_6
- Полістирол (PS): C_8H_8
- Полівінілхлорид (PVC): C_2H_3Cl
- Поліетилентерефталат (PET): $C_{10}H_8O_4$

Ці формули дають змогу визначити молекулярну масу кожного виду пластмаси, що необхідно для подальших розрахунків, зокрема для визначення вмісту води в пластиках.

Склад побутових відходів

Склад побутових відходів може значно варіюватися залежно від регіону, рівня економічного розвитку та культури поводження з відходами. В Україні, як і в інших європейських країнах, частка пластмас у побутових відходах становить приблизно 8–15% за масою [1]. Пластики є основним компонентом у складі відходів, і їх утилізація є важливою частиною стратегії зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Загальний склад пластмас у побутових відходах зазвичай включає кілька основних типів полімерів, серед яких:

- Поліетилен (PE) (C_2H_4): до 50% від загальної маси пластмасових відходів.
- Поліпропілен (PP) (C_3H_6): 15–20%.
- Полістирол (PS) (C_8H_8): 10–15%.
- Полівінілхлорид (PVC) (C_2H_3Cl): 5–10%.
- Поліетилентерефталат (PET) ($C_{10}H_8O_4$): 10–20%.

Ці пластики мають різні хімічні властивості та структуру, що визначає їхнє використання, а також утилізацію та вплив на довкілля. Знання складу побутових відходів є важливим для розробки ефективних методів їх обробки та утилізації.



Визначення бруutto-формули суміші побутових пластиків

Для визначення бруutto-формули суміші побутових пластиків [2] необхідно врахувати масові частки кожного виду пластмаси в суміші. Кожен вид пластмаси має свою молекулярну масу, що дозволяє оцінити вміст елементів у суміші.

Нормалізована формула та вміст елементів залежно від вологості

Якщо в пластмаси присутня волога, то це впливає на її хімічний склад. З підвищенням вологості [3] збільшується вміст Гідрогену (**H**) та Оксигену (**O**), тоді як кількість Карбону (**C**) і Хлору (**Cl**) залишається стабільною.

Таблиця (таблиця 1), що демонструє зміни вмісту елементів залежно від вологості, виглядає наступним чином:

Таблиця 1 – Бруutto-формула побутових відходів залежно від вологості

Вміст води (%)	C	H	O	Cl	Нормалізована формула
0	4.175	5.475	0.6	0.075	$C_{56}H_{73}O_8Cl_1$
10	4.175	5.675	0.7	0.075	$C_{56}H_{76}O_9Cl_1$
20	4.175	5.875	0.8	0.075	$C_{56}H_{78}O_{11}Cl_1$
30	4.175	6.075	0.9	0.075	$C_{56}H_{81}O_{12}Cl_1$
40	4.175	6.275	1.0	0.075	$C_{56}H_{84}O_{13}Cl_1$
50	4.175	6.475	1.1	0.075	$C_{56}H_{86}O_{15}Cl_1$
60	4.175	6.675	1.2	0.075	$C_{56}H_{89}O_{16}Cl_1$
70	4.175	6.875	1.3	0.075	$C_{56}H_{92}O_{17}Cl_1$
80	4.175	7.075	1.4	0.075	$C_{56}H_{94}O_{19}Cl_1$
90	4.175	7.275	1.5	0.075	$C_{56}H_{97}O_{20}Cl_1$
100	4.175	7.475	1.6	0.075	$C_{56}H_{100}O_{21}Cl_1$

Нормалізована формула та вміст елементів залежно від вологості

Маса води в пластмасах залежить від молярної маси зневоднених пластмас (МММ) та відносної вологості (φ) [4]. Формула для обчислення маси води (m) виглядає так:

$$m = \left(\frac{\varphi}{1-\varphi} \right) \cdot \mu, \quad (1)$$

де: μ — молярна маса абсолютно зневоднених пластмас,

φ — відносна вологість (у частках),

m — маса води, яка відповідає заданій вологості.

Для молярної маси сухої пластмаси $C_{56}H_{73}O_8Cl_1$, яка становить 909.594 г/моль, обчислюються значення маси води для різних рівнів вологості (таблиця 2).


Таблиця 2 – Розраховані значення маси води для різних рівнів вологості

Вміст води (%)	φ (відносна вологість)	m (маса води, г)
0	0.0	0.000
10	0.1	101.066
20	0.2	227.399
30	0.3	389.826
40	0.4	606.396
50	0.5	909.594
60	0.6	1364.391
70	0.7	2122.386
80	0.8	3638.376
90	0.9	8186.346
100	1.0	Невизначено (∞)

Ентальпія сухих відходів і вологих

Для розрахунку ентальпії необхідно врахувати стандартні ентальпії утворення компонентів пластмас. Для пластмаси $C_{56}H_{73}O_8Cl_1$ середня ентальпія утворення становить приблизно -1200 кДж/моль.

Ентальпія відходів з водою обчислюється як сума ентальпії пластмас без води та ентальпії води:

$$\Delta H_{\text{відходів}} = \Delta H_{\text{пластику}} + n_{\text{води}} \cdot \Delta H_{\text{води}} \quad (2)$$

де: $\Delta H_{\text{води}} = -285.83$ кДж/моль — ентальпія утворення води.

Результати [5] розрахунків (таблиця 3) ентальпії відходів пластмас з різним ступенем вологості.

Таблиця 3 – Розрахунок ентальпії відходів пластмас з різним вмістом води

Вміст води (%)	Ентальпія відходів (кДж/моль)
0	-1200
10	-1488.65
20	-1854.13
30	-2334.58
40	-2965.77
50	-3824.57
60	-5016.13
70	-6713.09
80	-9306.14
90	-14103.78
100	Невизначено

Висновки.

Результати проведених досліджень дозволили визначити брутто-формулу суміші твердих побутових відходів як суміші основних типів пластмас,



характерних для побутового сектора України. Встановлення такої формули є важливим етапом для проведення подальших розрахунків і моделювання процесів термічної переробки, таких як піроліз, газифікація та спалювання.

Аналіз хімічного складу основних пластиків, що найчастіше зустрічаються в побутових відходах, показав, що найбільшу частку займають поліетилен (PE), поліпропілен (PP) та поліетилентерефталат (PET). Відповідно до цих даних була визначена бруто-формула сухих відходів $C_{56}H_{73}O_8Cl_1$. Залежно від вмісту вологи у відходах, формула змінюється, що впливає на елементний склад суміші та її енергетичні характеристики.

Дослідження впливу вологості на хімічний склад відходів продемонструвало, що зі збільшенням вмісту води відбувається зростання частки гідрогену (H) та кисню (O), у той час як кількість карбону (C) залишається стабільною. Це суттєво впливає на енергетичну цінність відходів та процеси їх переробки.

Розрахунок ентальпії сухих та вологих відходів показав, що підвищення вологості призводить до зменшення енергетичної ефективності суміші через додаткові витрати енергії на випаровування води. Зокрема, ентальпія сухих відходів становить -1200 кДж/моль, тоді як при 50% вологості вона знижується до -3824,57 кДж/моль.

Таким чином, встановлена бруто-формула суміші побутових пластикових відходів є основою для розробки ефективних методів їх переробки. Використання отриманих результатів у розрахунках термічних процесів дозволить покращити енергетичні показники установок, знизити шкідливі викиди та забезпечити економічну доцільність переробки пластикових відходів. У подальшій роботі планується дослідження процесів піролізу та газифікації із застосуванням отриманої формули та аналіз отриманих продуктів переробки з метою визначення їх придатності для використання як вторинних енергетичних ресурсів.

Література:

1. Приходько, О. М., & Сафранов, Т. А. (2024). *Ресурсоцінна складова твердих побутових відходів окремих регіонів України*. Одеський державний екологічний університет
2. Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I., Feo, L., Fraternali, F. (2017). *Recycling of Plastic Solid Waste: A State of Art Review and Future Applications*. Composites Part B: Engineering
3. Кульчицький, С., & Пиндик, О. (2022). *Дослідження впливу вологості на механічні властивості полімерних матеріалів*. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
4. Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L. (2017). *Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made*. Science Advances
5. Cimpan, C., Wenzel, H., Pretz, T., & Jakobsen, L. G. (2015). *Technological Development and Trends in Plastic Waste Management*. Waste Management & Research



Abstract. The paper is devoted to determining the gross formula of a mixture of plastic waste consisting of the main types of household plastics, such as polyethylene, polypropylene, polystyrene, polyvinyl chloride and polyethylene terephthalate. The aim of the study is to create a basis for further calculations and modelling of thermal and chemical processes of plastic waste processing, in particular pyrolysis and gasification. The determination of the gross formula makes it possible to estimate the elemental composition of the mixture and its energy characteristics, taking into account the effect of humidity. It was found that with increasing humidity, the content of hydrogen and oxygen changes, which affects the energy efficiency of processing. In particular, an increase in humidity leads to a decrease in the energy value of the mixture due to additional energy consumption for water evaporation. The results of the study can be used to improve plastic waste recycling methods, optimise the energy performance of plants and reduce the negative impact on the environment. In addition, the development of automated systems for monitoring and controlling recycling processes will increase efficiency and reduce the human factor in these processes.

Key words: gross formula, plastic waste, recycling, moisture content, energy performance, automation.

Статтю надіслано: 06.01.2025 р.
© Зима І.В.