

DETERMINATION OF MORPHOLOGICAL COMPOSITION OF MUNICIPAL SOLID WASTE FOR MYKOLAYIV CITY (UKRAINE) AND FORECASTING OF THEIR ACCUMULATION IN THE FUTURE

Ushcats S.Yu.¹, Mihelev I.L.¹, Zholobenko N.Yu.¹, Markina L.M.²

Admiral Makarov National University of Shipbuilding
Heroiv Ukrainy ave., 9, 54025, Mykolayiv

State organization «State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management»
Metropolitan Lepkivskiyi str. 35, 03035, Kyiv
svitlana.ushkats@nuos.edu.ua, markserg@ukr.net,
mihelevigor@gmail.com, nataliya.zholobenko@nuos.edu.ua

The dynamics and morphology of municipal solid waste generated in Mykolayiv (Ukraine) during fifteen years are studied in the paper. The dynamics of morphological composition was determined and analyzed by seasons for the municipal solid waste of four districts of Mykolayiv city based on the data from the container sites of the city and the city waste landfill in the village of Vesnyane which occupies an area of 37.93 hectares. The annual dynamics of morphological composition of solid household waste for further use as a secondary raw material is studied to determine ways to improve efficiency of municipal waste management (stages of separate collection, sorting and processing of individual components of sorted waste, construction of complex recycling facilities, etc.). The main components of municipal solid waste, their percentage of total waste are identified. These empirical time dependences for the total amount of municipal solid waste, as well as the volumes of solid waste components, are approximated by polynomials and extrapolated to the next five years. This approach to forecasting the volume of municipal solid waste and its morphology can be useful in determining areas for further development and improvement of the solid waste management system.

Statistical data on the generation of municipal solid waste in Mykolayiv indicate an increase in volumes and growth of this dynamic until 2024, which has a significant negative impact on the environment and requires modern management solutions in the field of waste management.

The indicated statistical data of annual changes in the percentage content of the organic component, paper and cardboard, polymers, glass, fabric and wood, as well as the total volume of municipal solid waste were modeled using approximation by the 3-rd order polynomial. *Key words*: municipal solid waste, morphological composition, modeling, forecasting.

Визначення морфологічного складу твердих побутових відходів міста Миколаєва (Україна) та прогнозування їх накопичення в майбутньому. Ушкац С., Міхелєв І., Жолобенко Н., Маркіна Л.

Досліджено динаміку та морфологію твердих побутових відходів, що утворювалися за п'ятнадцять років у м. Миколаєві (Україна). Визначено та проаналізовано за сезонами динаміку морфологічного складу твердих побутових відходів чотирьох районів м. Миколаєва на основі даних з контейнерних майданчиків міста та міського полігону твердих побутових відходів в селі Весняне Миколаївського району, що займає площу 37,93 га. Досліджено річну динаміку морфологічного складу твердих побутових відходів з метою їх подальшого використання в якості вторинної сировини задля визначення шляхів підвищення ефективності у сфері поводження з відходами (впровадження етапів роздільного збирання, сортування й переробки окремих складових відсортованих відходів, будівництво комплексних об'єктів переробки тощо). Встановлено основні компоненти твердих побутових відходів, їх відсотковий склад від загальної кількості відходів. Ці емпіричні часові залежності для загального об'єму твердих побутових відходів, а також обсягів компонентів твердих побутових відходів апроксимуються поліномами та екстраполюються на наступні п'ять років. Такий підхід до прогнозування об'єму твердих побутових відходів та його морфології може бути корисним для визначення напрямів подальшого розвитку та вдосконалення системи поводження з ТПВ.

Статистичні дані щодо утворення твердих побутових відходів в м. Миколаєві свідчать про збільшення обсягів та зростання цієї динаміки до 2024 року, що значною мірою негативно впливає на навколишнє середовище та вимагає сучасних управлінських рішень у сфері поводження з відходами.

Зазначені статистичні дані річних змін відсоткового вмісту органічної складової, паперу та картону, полімерів, скла, тканини й деревини, а також загального обсягу твердих побутових відходів моделювались за допомогою апроксимації поліномом 3-го ступеня.

Ключові слова: тверді комунальні відходи, морфологічний склад, моделювання, прогнозування.

Formulation of the problem. Current analytical forecasts in the field of resource conservation show that, in the nearest future, the waste disposal will be much more expensive than recycling. In turn, such recycling will require the corresponding efficient industry of waste processing, which can work with various raw materials

in conditions where the actual component composition of waste may differ significantly and vary by time.

In the city of Mykolayiv, as well as in the majority of the cities of Ukraine, there are a lot of enterprises specialized in the transportation of waste to landfills, but they become less competitive when the waste

conservation will cost more than its processing. On the other hand, any recycling as more efficient waste management requires accurate forecasts for the composition of municipal solid waste (MSW) and its technologically valuable qualities. This issue becomes especially relevant in the context of Ukraine's path to European integration [1, 2].

Since the structure of MSW is a decisive factor for the development of the waste management system (stages of separate collection, sorting and further processing individual components of sorted MSW and, in general, construction of complex processing facilities, etc.), modeling and forecasting of morphological composition and quantity of MSW as well as their dynamics will allow determining the requirements and measures to be applied in the field of MSW management and, in particular, in the choice of ways of SW processing.

Analysis of recent research and publications.

Existing statistical data on municipal solid waste generation in Mykolayiv (and Ukraine in general) show a rapid increase of waste, which negatively affects the environment and requires modern management decisions in the field of waste management, which, in turn, will provide an economic and environmental aspect of security of Ukraine.

In the works of Petruk V., Markina L., Wambol V., Onishchenko S., Khyzhnyakova N., Samoylik M., Galushkina T., Dovga T. and others, attention is given to a multilevel approach in the field of waste management [3-9], where it is necessary to consider all the elements and factors (scientific and technological, environmental, socio-economic, natural and climatic, etc.) that affect the system as a whole. However, today the issue of further use of waste remains open.

The aim of this work is a detailed study of the morphological structure of MSW in Mykolayiv during recent years, as well as modeling (forecasting) of its dynamics for the coming years, which will allow improving the environmental and economic efficiency of the recycling industry due to the disposal of secondary resources and will reduce the anthropogenic impact on the environment.

In accordance with that aim, the following issues are considered in the paper:

1. Qualitative and quantitative comparative analysis of municipal solid waste (its volume and morphology in dynamics) for a period from 2005 to 2020 in Mykolayiv.

2. Mathematical approximation of changes in the volume of municipal solid waste as well as its morphology on the territory of Mykolayiv and the corresponding extrapolation (forecasting) for the next five years.

Materials and methods of research. During the theoretical and empirical studies the following general scientific methods were used: analysis (analysis of MSW accumulation), comparison and analogy; generalization and abstraction; modeling and forecasting (approximation by cubic polynomial).

Analysis of MSW and its morphology. The problem of solid waste for Mykolayiv is as urgent as for the majority of Ukrainian cities. In particular, 1203387 m³ of solid waste was generated on the territory of the city in 2020 [10].

The analysis of statistical indicators in the sphere of waste management in the city indicates the increasing dynamics of the MSW volume and the corresponding increase of waste per capita, which is a general trend in Ukraine.

Today the city has implemented a containerized system of MSW collection (except for the individual housing sector, where some part of it is serviced by a planned-subordinate or demand system). This containerized system, in turn, requires accurate data on the total volume of waste in the city to calculate the optimal number of containers, their location and the appropriate number of service vehicles.

The dynamics of the total amount of MSW, which were generated on the territory of Mykolayiv for 2005–2020 is shown in Fig. 1.

That Figure demonstrates that, on average, the total volume of SW was increasing since 2005, except for some decline in 2010 and 2015.

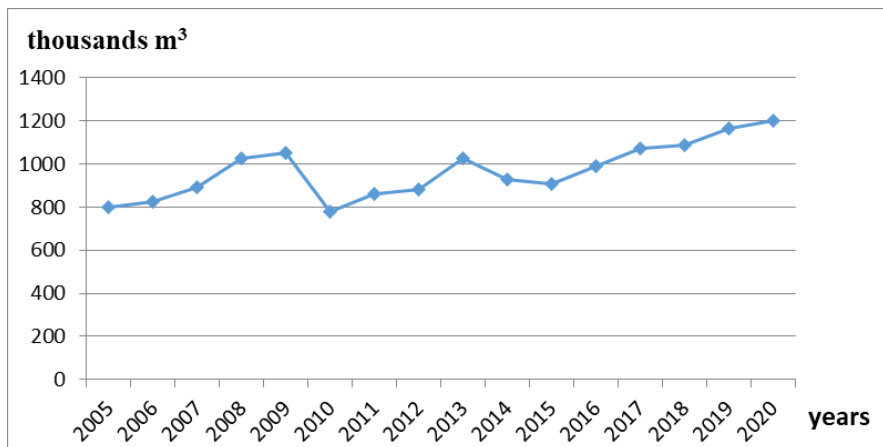


Fig. 1. Dynamics of the total MSW volume in Mykolayiv for 2005–2020

Accordingly, the analysis of the collected quantitative data and prediction of the MSW volume for future years can allow some conclusions about the feasibility of the development of specific areas of the industrial processing industry in the region.

The situation concerning the qualitative (i.e., morphological composition of MSW) is quite problematic. There has been no systematic study of the structure of MSW in our country, and the data available in the public domain are rather due to sample non-systematic studies in several regions of Ukraine: their results differ significantly from each other, and sometimes contradict one another. According to the research materials of the Sixth National Communication of Ukraine on Climate Change [11], the structure of MSW is the following: food waste – 35–50%, paper and cardboard – 10–15%, polymers – 9–13%, wood – 8–10%, metal – 2%, textiles – 4–6%, construction waste – 5%, wood – 1%, and other waste – 10%.

The current morphological composition of waste significantly differs even from that of ten years ago [12, 13]. The increased need for disposable packaging materials [14], especially due to the pandemic, has significantly widened the morphology of modern MSW. In contrast to the general dynamics of the total MSW volume, the empirical data on MSW morphology considerably vary in different cities: sometimes, certain indicators differ by several times (!). The results of the research might be affected by several factors: seasonal features, geographic location, characteristics of the economic wellbeing of the city’s population, industrial and secondary food market conditions, etc. Morphological structure of some basic household waste products determined for settlements with different numbers of inhabitants is given in Table 1 [15, 16].

It is known that the MSW morphology has a heterogeneous nature and depends on a lot of various factors [17]. Taking into account the periodicity and frequency of measurements, there is always some variability of empirical data, which leads to significant deviations of results. In order to obtain valid results, it is extremely important to use proven and theoretically grounded methods to investigate the MSW morphology that will allow the accurate and adequate analysis and predictions. One of the important conditions for such a complex research is a motivated selection of point (representative) samples, where the measured values

of the ingredients do not change, which will ensure the validity of the primary data, and the subsequent statistical analysis of the information obtained by taking into account the necessary criteria.

The corresponding studies the MSW composition in Mykolaiv were carried out in accordance with the Methodological Recommendations for determining the morphological composition of municipal solid waste [18] by the gravimetric method [19] and using natural measurements. In addition to the data on the MSW generation, the local population of Mykolaiv regions was analyzed. In particular, the research territory covered four administrative districts of Mykolayiv with the corresponding facilities of waste generation (residential apartment buildings and individual houses; institutions, non-production enterprises of social and household purposes) and the city landfill for the disposal of MSW in the village Vesnyane. According to the Methodological Recommendations [18], the actual value of each indicator at the selected points was determined using the measurement protocol, and the dynamics of those values were examined with regard for the season components.

Empirical measurements of the volumes and density of MSW were carried out directly at the objects of their generation. The content of different test containers (from 0.75 to 1.1 m³) was manually disassembled into morphological components which than were weighted separately. Such field experiments were carried out at 20 sites for the collection of waste serving more than 12,000 people totally. Research continued during 2019–2020 (Fig. 2): in the winter, spring, summer, and autumn periods. Samples were selected with at least three times repeatability and followed by statistical processing of the obtained data.

Based on the collected and processed data on the MSW morphology, it is possible to approximate the corresponding time dependence for each MSW component (as well as their total volume) and even predict the behavior of such dependence for several years ahead that, in turn, will indicate the directions in which the system of MSW management should be improved and possibly demonstrate the investment attractiveness of Mykolayiv region in that field.

Thus, to create the required model, we used statistical data on annual changes over the years for each morphological component in Mykolayiv city and the city landfill, which would characterize

Table 1

Morphological structure of MSW in some Ukrainian cities

Components of waste	Chernihiv	Odesa	Ternopil	Lviv
Food and other organic waste	36%	36,1%	35%	26%
Paper and cardboard	15%	14,3%	12%	10%
Plastic	9%	2%	16%	13%
Glass	16%	6,2%	7%	4%
Textiles	2%	3,4%	8%	8%

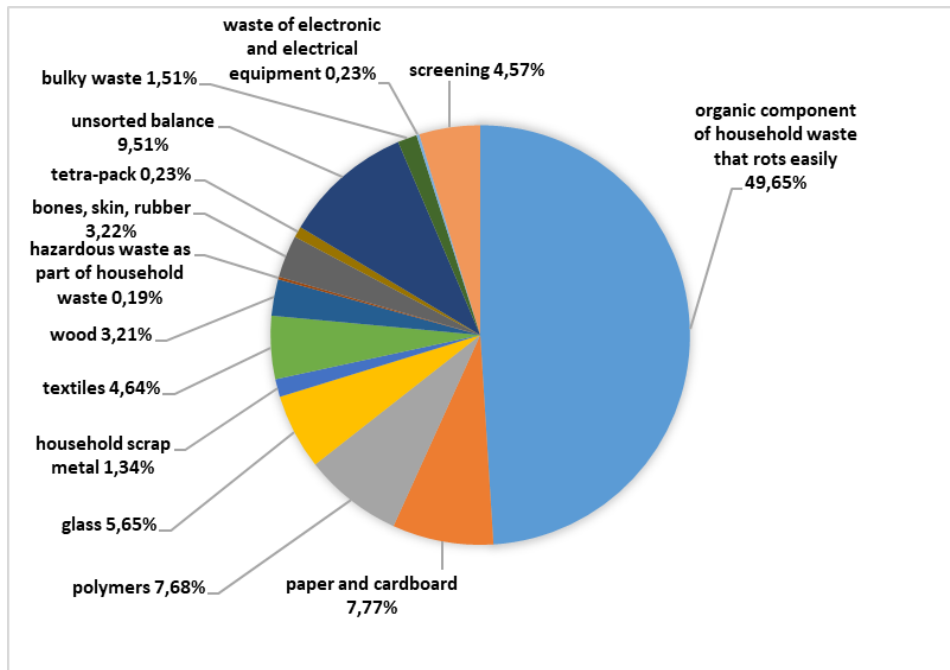


Fig. 2. Morphological structure of MSW in Mykolayiv for the seasons of 2020

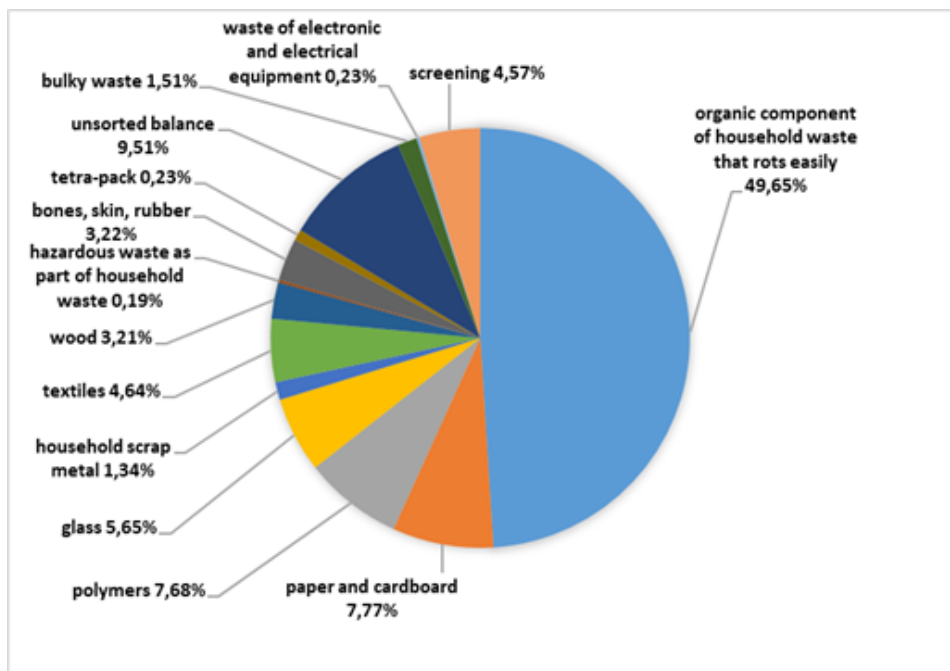


Fig. 3. The morphological structure of MSW in Mykolaiv for 2020 Approximation and extrapolation

the changes in the amount of MSW generated at given facilities.

These statistics of annual changes in the volumes of organic matter, paper/cardboard, polymers, glass, fabric and wood, as well as the total volume of MSW were modeled by the 3-rd order polynomial approximation,

$$P_3(x_i, a, b, c, d) = ax_i^3 + bx_i^2 + cx_i + d, \quad (1)$$

the power coefficients of which were determined by the method of least square deviations:

the power coefficients of which were determined by the method of least square deviations:

$$\sum_{i=1}^n [y_i - P_3(x_i, a, b, c, d)]^2 = \Phi(a, b, c, d) = \text{mir},$$

where x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) – approximation nodes; y_i – known empirical values at nodes (results of measurements); a, b, c, d – unknown power coefficients of the approximating function.

Necessary conditions for the existence of an extremum of $\Phi(a, b, c, d)$ are the following:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Phi(a, b, c, d)}{\partial a} = 0, & \quad \frac{\partial \Phi(a, b, c, d)}{\partial b} = 0, \\ \frac{\partial \Phi(a, b, c, d)}{\partial c} = 0, & \quad \frac{\partial \Phi(a, b, c, d)}{\partial d} = 0, \end{aligned} \right\}$$

and they yield a system of linear algebraic equations to define unknown coefficients a, b, c and d :

$$\left. \begin{aligned} a \cdot S_6 + b \cdot S_5 + c \cdot S_4 + d \cdot S_3 &= S_{13}; \\ a \cdot S_5 + b \cdot S_4 + c \cdot S_3 + d \cdot S_2 &= S_{12}; \\ a \cdot S_4 + b \cdot S_3 + c \cdot S_2 + d \cdot S_1 &= S_{11}; \\ a \cdot S_3 + b \cdot S_2 + c \cdot S_1 + d \cdot n_2 &= S_{10}, \end{aligned} \right\}$$

where the coefficients at the unknown a, b, c and d are determined by the formulas:

$$S_1 = \sum_{i=1}^n x_i, \quad S_2 = \sum_{i=1}^n x_i^2, \quad S_3 = \sum_{i=1}^n x_i^3, \quad S_4 = \sum_{i=1}^n x_i^4,$$

$$S_5 = \sum_{i=1}^n x_i^5, \quad S_6 = \sum_{i=1}^n x_i^6$$

(i.e., in general, $S_j = \sum_{i=1}^n x_i^j$ for $i = 1, 2, 3, \dots, 6$ and right parts are the following:

$$S_{10} = \sum_{i=1}^n y_i, \quad S_{11} = \sum_{i=1}^n y_i x_i, \quad S_{12} = \sum_{i=1}^n y_i x_i^2, \quad S_{13} = \sum_{i=1}^n y_i x_i^3$$

(i.e., in general, $S_{1k} = \sum_{i=1}^n y_i x_i^k$ for $i = 0, 1, 2, 3$).

To solve this system of linear algebraic equations, the Gaussian method was used. According to the results of research and mathematical modeling, it is established that the 3-rd order polynomial provides a good approximation of annual changes in the volume of MSW components (see Figures 4, 5).

Conclusions. The presented model and obtained results of approximation adequately reflect the dynamics

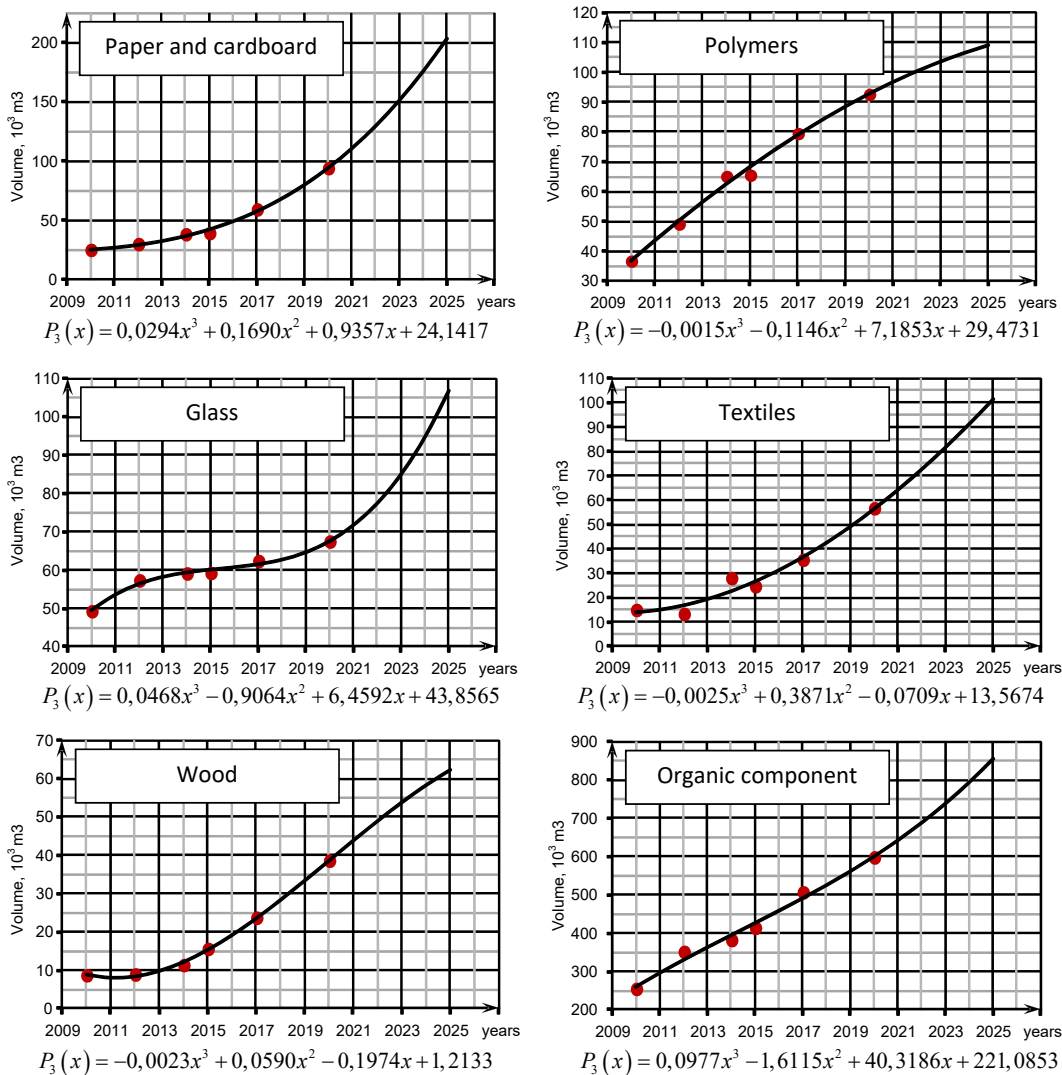


Fig. 4. Statistical data on the morphological composition of MSW in Mykolayiv for different years (points) and their approximation by a 3-rd order polynomial (solid lines). The variable x in the polynomial defines the year relative to 2009

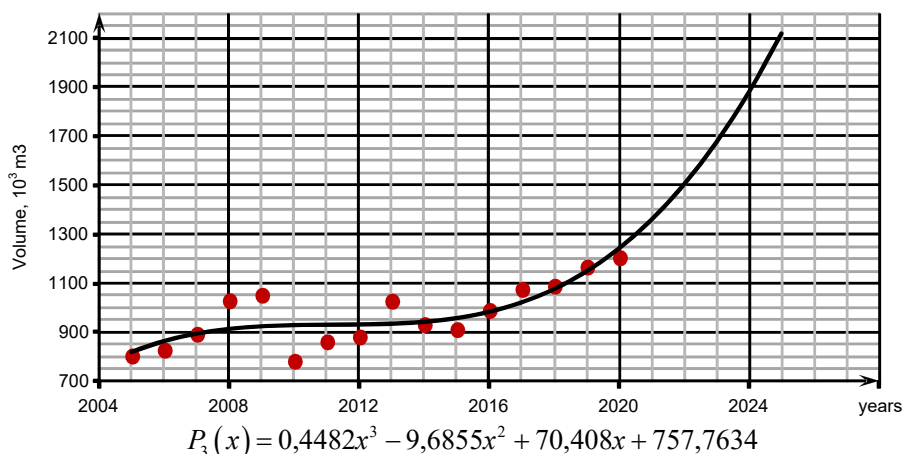


Fig. 5. The total volume of MSW in Mykolayiv for different years (points) and the approximation by a 3-rd order polynomial (solid lines).
The variable x in the polynomial defines the year relative to 2004

of MSW morphology in Mykolayiv during 2009–2020, which, in turn, indicates the following: at the moment, almost 50% of the MSW is organic waste, 7.8% – paper and cardboard, 7.7% – polymers, glass – 5.6%, textiles – 4.6% and so on.

In addition, using the mentioned mathematical approximation to forecast, we can state that the volume of MSW will increase steadily in Mykolayiv for the next 5 years (see Fig. 5), and, correspondingly, the volume of technologically valuable secondary raw materials will also increase: such components as paper and cardboard will almost double, the volume of polymers increase by about 20%, textiles – by 60%, etc. that is a serious

argument to start the system of MSW management in Mykolayiv.

However, at present time, the quality of secondary material resources is a significant problem for the implementation of waste sorting and recycling facilities in the city because the waste of organic origin (as the largest group of waste) is difficult to recycle. Using the experience of European and Ukrainian cities, it is advised to improve and implement biotechnological processing [21, 22]. As to the polymers, paper, glass, textiles, etc., it is possible to propose the use of partial manual sorting, followed by mechanical separation of the unsorted residue.

Література

- Програма інтеграції України до Європейського Союзу. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0001100-00#Text> (дата звернення: 22.02.2021).
- Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80> (дата звернення 18.02.2021).
- Управління та поводження з відходами. Частина 2. Тверді побутові відходи: навч. посіб. / В. Г. Петрук та ін. Вінниця : ВНТУ, 2015. 100 с.
- Маркіна Л.М. Поводження з твердими побутовими відходами у великих містах та поселеннях: навч. посіб. Миколаїв: НУК, 2015. 216 с.
- Прогнозування рівня безпеки несанкціонованого сміттєзвалища з використанням імітаційного моделювання/ Вамболь С.О., Вамболь В.В., Колосков В.Ю., Деркач Ю.Ф. Екологічна безпека. 2016. № 2. С. 51–58.
- Хижнякова Н. О. Обґрунтування проектів комплексного перероблення побутових відходів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Логістика»*. 2003. №. 472. С. 522–526.
- Самойлік М. С. Економічна модель розвитку сфери поводження з твердими відходами регіону з урахуванням екологічних факторів. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2014. № 1. С. 82–87. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VPDAA_2014_1_22 (дата звернення 18.02.2021).
- Довга Т. М. Основні тенденції та закономірності утворення і переробки твердих побутових відходів в Україні. *Ефективна економіка*. 2012. № 10.
- Галушкіна Т. П., Жемба А. Й., Серницька К. В. Екологічна політика України в контексті глобальних кліматичних викликів. *Вісник національного університету водного господарства та природокористування. Економічні науки*. Рівне, 2018. № 4. С. 248–258.
- Головне управління статистики у Миколаївській області. URL: <http://www.mk.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення 18.02.2021).
- Шосте Національне повідомлення України з питань зміни клімату. URL: [https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/europe/russia-ukraine-georgia/MENR.--2012.--Sixth-National-Communication-to-the-UNFCCC-of-Ukraine-\[UKR\].pdf](https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/europe/russia-ukraine-georgia/MENR.--2012.--Sixth-National-Communication-to-the-UNFCCC-of-Ukraine-[UKR].pdf) (дата звернення 18.02.2021).
- Артов А. М., Сороковський В. Є. Планування міжмуніципальної системи інтегрованого поводження з твердими побутовими відходами : метод. посіб. / за заг. ред В. Є. Сороковського. Швейцарськоукраїнський проект «Підтримка децентралізації в Україні». К. : DESPRO, 2016. 103 с.

13. Толкованова В.В. Управління твердими побутовими відходами в умовах реформування місцевого самоврядування та розвитку міжмуніципального співробітництва : навч.-практ. посіб. / за заг. ред. В.В.Толкованова. К. : DGIZ GmbH, 2018. 393 с.
14. Liudmyla M. Markina, Natalya Yu. Zholobenko, Svitlana Yu. Ushkats Features of waste management during the COVID-19 pandemic. *Shipbuilding & marine infrastructure*. 2020. № 1(13) С. 75–89.
15. Стратегія управління відходами у Львівській області до 2030 року. URL: [http://gw1.oblrada.lviv.ua/rada/rishennialor.nsf/52889c345440ab40c2257b55007e8f51/7ccf6ba2bc2c5a79c225820300531eb7/\\$FILE/580_dod.pdf](http://gw1.oblrada.lviv.ua/rada/rishennialor.nsf/52889c345440ab40c2257b55007e8f51/7ccf6ba2bc2c5a79c225820300531eb7/$FILE/580_dod.pdf) (дата звернення 18.02.2021).
16. Програма поводження з твердими побутовими відходами в Одеській області на 2018–2022 роки. URL: <http://oblrada.odessa.gov.ua/wp-content/uploads/03-21-VII.pdf> (дата звернення 18.02.2021).
17. Погрібний І. Я. Проблеми визначення морфологічного складу твердих побутових відходів з урахуванням сучасних умов переробки. *Ефективна економіка*. 2012. № 11.
18. «Методичні рекомендації з визначення морфологічного складу твердих побутових відходів» затверджених Наказом Міністерства з питань житлово-комунального господарства України № 39 від 16.02.2010 р.
19. ПНД Ф 16.3.55-08 «Тверді побутові відходи. Визначення морфологічного складу гравіметричним методом».
20. Маркіна Л.М., Ушкац С.Ю., Жолобенко Н. Ю. Статистичне прогнозування утворення твердих побутових відходів у Миколаївській області. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження: матеріали доп. Всеукр. наук.-практ. конф. 3–4 груд. 2020 року*. Полтава, С. 42–45.
21. Побутові відходи. Технологія перероблення органічної речовини, що є у складі побутових відходів, СОУ ЖКГ 03.09-014:2010. *Видання офіційне*. К. : 2010 р. 39 с.
22. Біоенергетична асоціація України. URL: <http://www.uabio.org/activity/uabio-analytics> (дата звернення 18.02.2021).