

Научная статья

УДК 687.022

EDN PJRLLR

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-3-69-44-50>

Сергей Дмитриевич Тарасов

Костромской государственный университет, г. Кострома, Россия

ooo-kk-44@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9830-658X>

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОЙ МЕТОДИКИ РАЗМЕЩЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ОБУВИ С УЧЕТОМ КОНТУРА И ТОПОГРАФИИ КОЖИ

Аннотация. В статье приводятся результаты синтеза цифровой модели методики размещения деталей обуви с учетом контура и топографии раскраиваемой кожи. Объектом исследования в данной статье является технологический процесс раскроя кожи при производстве обуви. Предмет исследования в статье – возможности автоматизации процесса раскроя. Синтез математической модели включает в себя создание цифрового двойника раскраиваемой кожи, разработку методики размещения деталей обуви внутри контура раскраиваемой кожи. Синтез цифрового двойника раскраиваемой кожи выполнен с помощью использования алгоритмов машинного зрения. Разработана методика выделения топографических участков кожи. Разработка методики размещения деталей обуви осуществлена с использованием принципов булевой геометрии. Методика размещения деталей разработана с возможностью выбора одного из восьми направлений на плоскости, выбора начальной точки размещения деталей. Разработанная математическая модель методики размещения деталей реализована в программе.

Ключевые слова: детали обуви, кожа, топография кожи, методика размещения деталей обуви, математическая модель контура материала, цифровой двойник контура материала, контур материала, процент использования площади материала

Для цитирования. Тарасов С. Д. Математическая и программная модель адаптивной методики размещения деталей обуви с учетом контура и топографии кожи // Технологии и качество. 2025. № 3(69). С. 44–50. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-3-69-44-50>.

Original article

Sergey D. Tarasov

Kostroma State University, Kostroma, Russia

MATHEMATICAL AND SOFTWARE MODEL OF THE ADAPTIVE METHOD OF PLACING SHOE PARTS TAKING INTO ACCOUNT THE CONTOUR AND TOPOGRAPHY OF THE LEATHER

Abstract. The article presents the results of the synthesis of a digital model of the technique for placing shoe parts taking into account the contour and topography of the cut leather. The object of the study in this article is the technological process of cutting leather in shoe manufacturing. The subject of the study in the article includes the possibilities of cutting process automation. The synthesis of the mathematical model includes the creation of a digital twin of the cut leather, the development of a technique for placing shoe parts inside the contour of the cut leather. The synthesis of the digital twin of the cut leather is performed using machine vision algorithms. A technique for identifying topographic areas of leather is developed. The technique for placing shoe parts is developed using the principles of Boolean geometry. The technique for placing parts is developed with the ability to select one of eight directions on the plane, select the starting point for placing parts. The developed mathematical model of the technique for placing parts is implemented in the program.

Keywords: shoe parts, leather, leather topography, method of shoe parts placement, mathematical model of material contour, digital twin of material contour, material contour, percentage of material area utilization

For citation: Tarasov S. D. Mathematical and software model of the adaptive method of placing shoe parts taking into account the contour and topography of the leather. Technologies & Quality. 2025. No 3(69). P. 44–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-3-69-44-50>.

Оригинальная методика размещения деталей обуви на листе материала со сложным контуром представлена в статье [1]. Методика основана на использовании принципов булевой геометрии, один из которых в применении к задаче размещения деталей внутри сложного контура материала выражается логическим выражением

$$S_d = S_{\Pi}, \quad (1)$$

где S_d – площадь полигона детали;

S_{Π} – площадь пересечения полигона детали и полигона, образованного контуром материала.

Для нахождения места размещения полигона детали внутри полигона, образованного контуром материала, осуществляется последовательный поиск путем дискретного движения центра симметрии детали по оси X с величиной шага h_x , а также с промежуточными шагами по оси Y с величиной шага h_y .

Под центром симметрии в настоящей работе понимается точка, координаты которой вычисляются как

$$X_{\Pi} = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}, \quad Y_{\Pi} = \frac{y_{\max} + y_{\min}}{2},$$

где $x_{\max}$, $y_{\max}$ – максимальные координаты контура детали;

$x_{\min}$, $y_{\min}$ – минимальные координаты контура детали.

Промежуточные шаги по оси Y выполняются тогда, когда центр симметрии детали прошел от начальной точки до крайней правой точки контура материала по оси X (до линии $x = x_{\max}$), но деталь при этом не разместилась. Каждый шаг по оси X сопровождается провер-

кой выражения (1) на истинность [1]. Начальной точкой движения детали является в этом случае точка $(X_{\min}, Y_{\min})$ контура материала – с этой точкой совмещается центр симметрии детали путем сдвига. Схема поиска места размещения для детали представлена на рисунке 1, а. Если на одном из шагов выражение (1) оказывается истинным, то положение полигона детали фиксируется, деталь считается размещенной. Для того чтобы исключить наложение следующей детали на уже размещенную деталь, производится вычисление геометрической разности между полигоном материала и полигоном размещенной детали. Пример геометрической разности показан на рисунке 1, б.

На рисунке 1, а места проверки равенства (1) совпадают с положениями центров симметрии деталей. После вычисления геометрической разности методика повторяет операции со следующей деталью. Также следует отметить, что контуры материала и деталей строго привязаны к координатной сетке и представлены в формате наборов координат каждого контура: $[[X_1, Y_1], [X_2, Y_2], \dots, [X_n, Y_n]]$.

Представленная в статье [1] методика показала эффективность по критерию процента использования площади материала. Но в исходном виде данная методика не может быть применена на раскройном оборудовании, так как в ней реализовано только одно направление размещения деталей – вдоль оси X с промежуточными шагами по оси Y [1, с. 364–365]. Тогда как для симметричного размещения относительно хребтовой линии кожи требуется минимум два направления. Это требование к методике объясняется рекомендациями к размещению деталей на коже [2, с. 112–113].

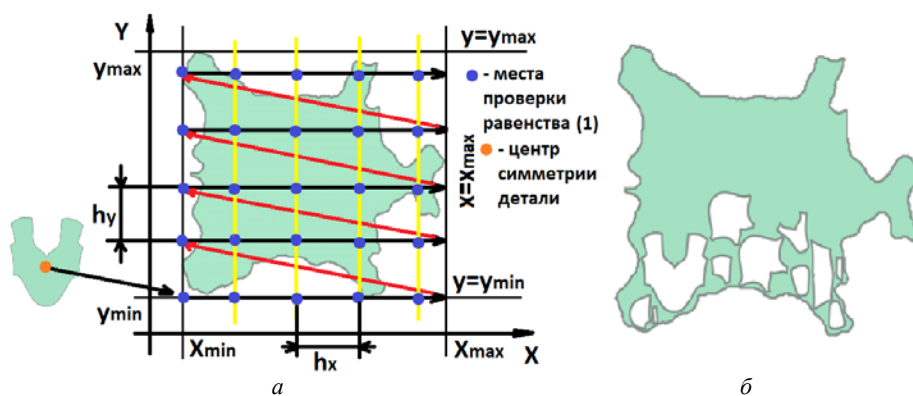


Рис. 1. Принцип исходной методики размещения:

а – схема поиска деталью места для размещения;

б – геометрическая разность между полигоном материала и полигонами размещенных деталей

В исходной методике только одно направление размещения – вдоль положительного направления оси X с промежуточными шагами по положительному направлению оси Y . Назовем такое направление размещения деталей XY . На плоскости возможно реализовать 8 направлений размещения. Схемы размещения деталей в зависимости от выбранного направления представлены на рисунке 2. Рассмотрим их более подробно:

1) XY : Из крайней левой нижней точки к крайней правой верхней точке материала. Основное движение детали – по оси X в положительном направлении (по горизонтали). Промежуточные шаги – по оси Y в положительном направлении;

2) $X-Y$: Из крайней левой верхней точки к крайней правой нижней точке. Это направление критически важно для симметричного размещения. Основное движение детали – по оси X в положительном направлении. Промежуточные шаги – по оси Y в отрицательном направлении;

3) YX : Из крайней левой нижней точки к крайней правой верхней точке. Основное движение детали – по оси Y в положительном на-

правлении (по вертикали). Промежуточные шаги – по оси X в положительном направлении;

4) $Y-X$: Из крайней правой нижней точки к крайней левой верхней точке. Основное движение детали – по оси Y в положительном направлении. Промежуточные шаги – по оси X в отрицательном направлении;

5) $-XY$: Из крайней правой нижней точки к крайней левой верхней точке. Основное движение детали – по оси X в отрицательном направлении. Промежуточные шаги – по оси Y в положительном направлении;

6) $-X-Y$: Из крайней правой верхней точки к крайней левой нижней точке. Основное движение детали – по оси X в отрицательном направлении. Промежуточные шаги – по оси Y в отрицательном направлении;

7) $-YX$: Из крайней левой верхней точки к крайней правой нижней точке. Основное движение детали – по оси Y в отрицательном направлении. Промежуточные шаги – по оси X в положительном направлении;

8) $-Y-X$: Из крайней правой верхней точки к крайней левой нижней точке. Основное движение детали – по оси Y в отрицательном направлении. Промежуточные шаги – по оси X в отрицательном направлении.

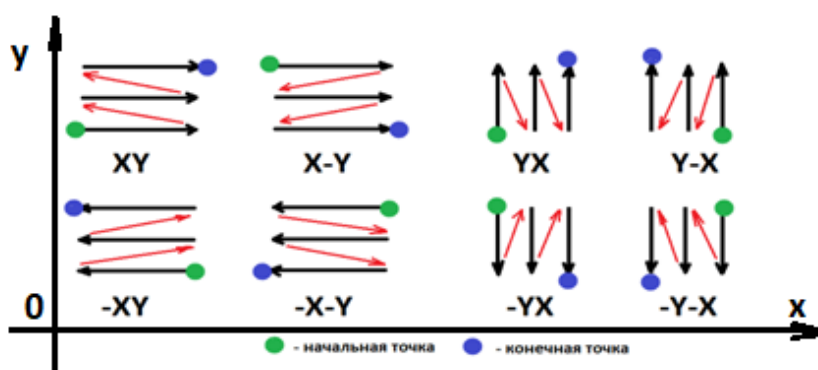


Рис. 2. Схемы размещения деталей внутри контура материала

Вне зависимости от направления размещения деталей базовыми остаются принципы: а) равенства площадей детали и материала; б) геометрическая разность. Изменяется только схема движения детали. Методика была реализована в виде программной функции. Функция должна принимать на вход следующие аргументы: контур кожи, набор деталей (в виде файла формата CUT), направление размещения, значения величин шагов по осям X и Y , а также начальную точку размещения деталей. Последний аргумент заслуживает особого внимания. Начальная точка размещения необходима для того, чтобы оператор имел возможность выбрать конкретную область на раскраиваемой коже.

Если такая точка не указана, функция по умолчанию размещает детали, начиная с крайней точки контура материала. Крайняя начальная точка определяется выбором направления размещения. Результаты размещения деталей с выбором направлений представлены на рисунке 3.

Из рисунка видно, что каждое размещение деталей уникально, несмотря на сходство результатов по столбцам. Результаты размещения деталей на контуре материала с явным указанием начальной точки представлены на рисунке 4.

Начальная точка, вне зависимости от того, указана она явно или это крайняя точка материала, будет совпадать с центром симметрии

каждой размещаемой детали. Начальная точка – это начальное положение центров симметрий размещаемых деталей.

Для реализации размещения, симметричного относительно хребтовой линии кожи, требуется задействовать два направления – $X\bar{Y}$

и $X\bar{Y}$. Размещение с направлением $X\bar{Y}$ необходимо реализовать на верхней половине кожи, размещение $X\bar{Y}$ необходимо реализовать на нижней половине кожи. Результат симметричного размещения деталей представлен на рисунке 5.

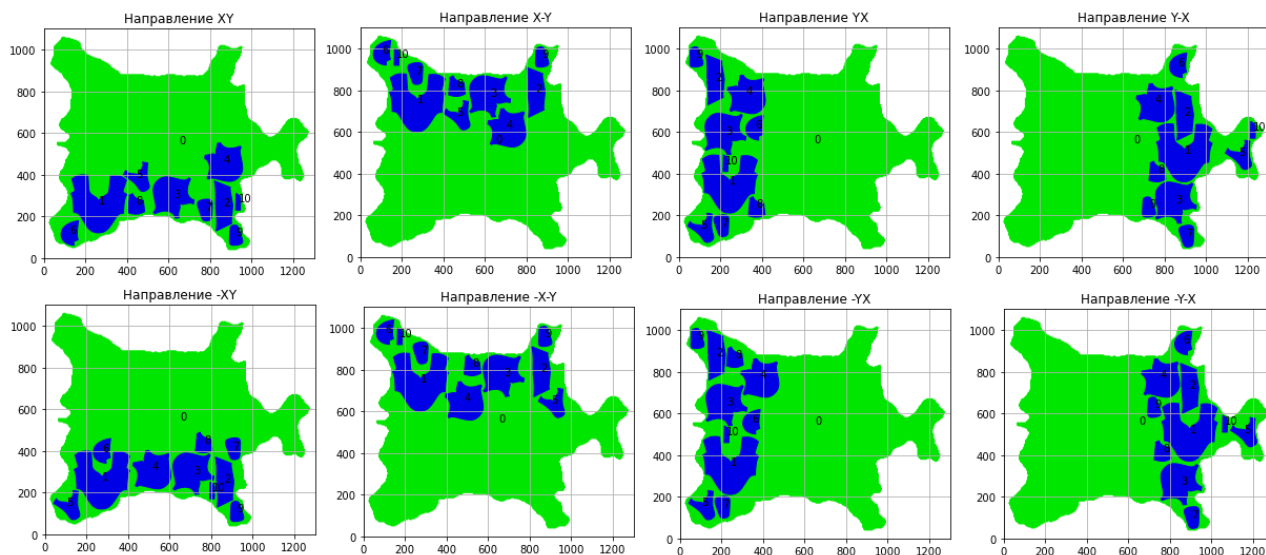


Рис. 3. Результаты размещения деталей обуви в зависимости от выбранного направления без указания начальной точки размещения

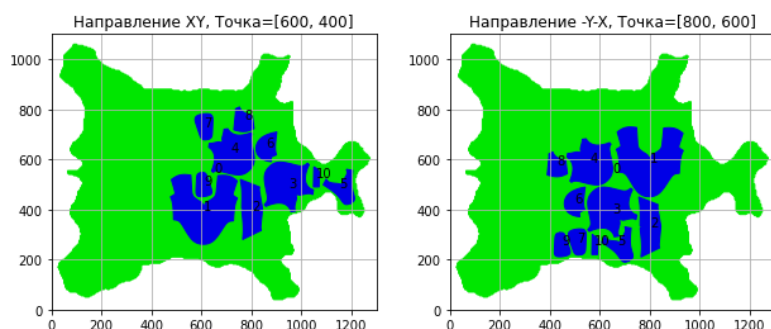


Рис. 4. Размещение деталей с явным указанием начальной точки размещения



Рис. 5. Симметричное размещение набора деталей обуви

Разработанная адаптивная методика размещения деталей обуви внутри контура раскраиваемого материала была испытана на раскройном станке АРК 1500 [3, 4]. На рабочую область раскройного стола была положена хромовая полукожа, на которой специальным маркером обозначена граница чепрачной части кожи и порока. Контур раскраиваемой кожи, границы чепрачной части и порока были выделены с помощью алгоритмов машинного зрения [5]. Далее произведена коррекция размеров полученных контуров с помощью опорного контура – границы раскройного стола, который имеет размеры 1,5×1,0 м. Выделенный контур полукожи, полигон, образованный данным контуром, – это цифровой двойник данной полукожи, т. е. циф-

ровой двойник раскраиваемого материала. Фотография раскройного стола АРК 1500 с разложенной кожей представлена на рисунке 6.



Рис. 6. Кожа на раскройном столе

На выделенных топографических участках кожи посредством разработанной методики были размещены детали обуви согласно степени ответственности данных деталей. Ответственные детали размещены на чепрачной части кожи, менее ответственные – на полах. Рекомендации по размещению деталей в зависимости от их степени ответственности приведены в лите-

ратуре [6]. Степень ответственности детали кодируется в файле CUT. Цифровой двойник кожи с выделенными участками представлен на рисунке 7, а. Результат размещения деталей на топографических участках кожи с помощью адаптивной методики представлен на рисунке 7, б.

Процент использования площади материала для каждого размещения приведен в таблице.

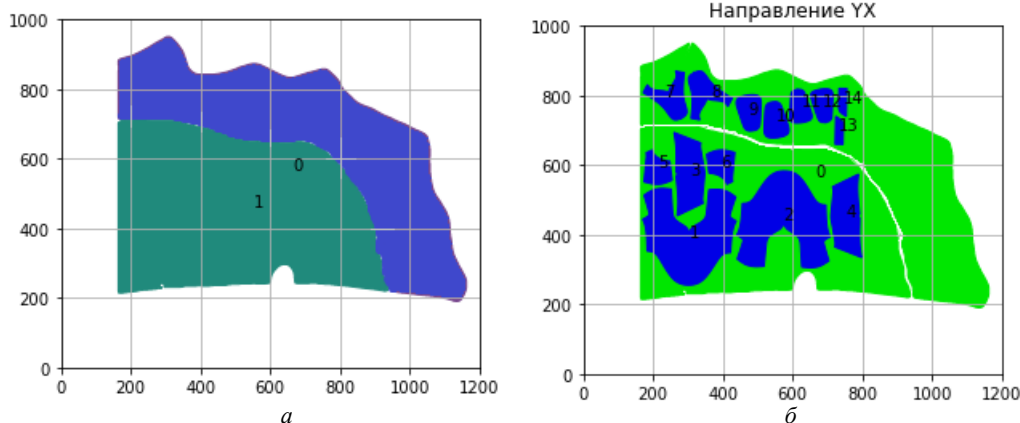


Рис. 7. Результат применения предложенной методики*:

а – цифровой двойник раскраиваемой кожи (синим обозначены полы, зеленым – чепрак);
б – размещение деталей на участках в соответствии со степенью ответственности деталей

Т а б л и ц а

Использование площади материала

Вариант размещения деталей	Использование площади материала, %
Рис. 2, XY	52,7
Рис. 2, X-Y	50,3
Рис. 2, YX	64,2
Рис. 2, Y-X	62,5
Рис. 2, -XY	65,9
Рис. 2, -X-Y	57,1
Рис. 2, -YX	63,3
Рис. 2, -Y-X	63,5
Рис. 3, XY	64,5
Рис. 3, -Y-X	67,8
Рис. 5	66,7
Рис. 7, б	41,5

Существует зависимость между выбранным направлением размещения и процентом использования площади материала. Однако аналитического выражения для этой зависимости не существует, это случайный фактор, который обусловлен формой полигона материала и формами деталей. Низкий процент использования материала в последней строке объясняется тем, что при разделении кожи на участки раскроя возникли значительные пространства незаполненного деталями материала (см. табл.).

Разработанная методика реализована в виде программной библиотеки на языке Python. В библиотеке также реализована возможность

перезаписывать файлы CUT, где содержатся исходные координаты контуров деталей. Это позволяет в перспективе напрямую использовать библиотеку на раскройном комплексе АРК 1500, а не интегрировать ее в компьютер станка. Предложенная методика размещения деталей качественно отличается от классических комбинаторных методов размещения, таких как bottom-left [7] тем, что учитывает контуры деталей и материала, тогда как эти методы работают с прямоугольными материалами и деталями. Методика также отличается и от комбинаторных методов размещения [8, 9], реализованных в таких программах, как [10, 11], в аспекте управляемости процессом, так как комбинаторные методы не реализуют различные направления и начальные точки.

* Полноцветная версия представлена на сайте. URL: <https://tik.kosgoss.ru>.

ВЫВОДЫ

Разработанная методика позволила решить следующие задачи:

- учет сложного контура раскраиваемой кожи при размещении деталей;
- возможность выбора оператором станка оптимального направления и начальной точки размещения;
- синтез цифрового двойника раскраиваемой кожи;
- выделение топографических участков на коже;
- размещение деталей обуви на разных топографических участках в зависимости от ответственности деталей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тарасов С. Д., Староверов Б. А., Лапшин В. В. Программа оптимального размещения шаблонов деталей обуви с учетом контура раскраиваемого материала // Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Кострома : Костромской государственный университет, 2025. С. 363–367.
2. Иванов Н. Н., Лиокумович Х. Х. Технология обуви : учебник. М. : Легкая индустрия, 1970. 408 с.
3. Разработка конкурентоспособного автоматизированного раскройного комплекса материалов / В. В. Лапшин, М. П. Левыкин, Б. А. Староверов, А. А. Кузнецов // Инновации в текстиле, одежде, обуви (ICTAI-2023) : материалы докл. Междунар. науч.-техн. конф. Витебск : ВГТУ, 2023. С. 44–48.
4. Использование современных технологий раскроя материалов в рамках импортозамещения / А. А. Кузнецов, В. В. Лапшин, М. П. Левыкин, А. Ш. Иргашева // Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Кострома : Костромской государственный университет, 2023. С. 196–198.
5. Программная библиотека машинного зрения OpenCV : офиц. сайт разработчиков. URL: <https://opencv.org> (дата обращения: 19.03.2025).
6. Фурашова С. Л., Милюшкова Ю. В. Технология раскроя и основы рационального использования материалов : лабораторный практикум. Витебск : ВГТУ, 2020. 100 с.
7. Dowsland K. A., Vaid S., Dowsland W. B. An algorithm for polygon placement using a bottom-left strategy // European Journal of Operational Research. 2002. Vol. 141, is. 2. P. 371–381.
8. Thomas J., Chaudhari N. S. A new metaheuristic genetic-based placement algorithm for 2D strip packing // Journal of Industrial Engineering International. 2014. Vol. 10, No 47. P. 1–16.
9. Enhancing two dimensional irregular pattern packing using a modified genetic algorithm and image processing / Longhui Meng, Liang Ding, Maen Atli, Aqib Mashood Khan, Yicai Shan, Muhammad Umar Farooq // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2025. Vol. 155. P. 111040.
10. Описание программы SVGNest : офиц. сайт разработчиков. URL: <https://svgnest.com> (дата обращения: 21.04.2025).
11. Описание программы DeepNest : офиц. сайт разработчиков. URL: <https://deepnest.io> (дата обращения: 21.04.2025).

REFERENCES

1. Tarasov S. D., Staroverov B. A., Lapshin V. V. Program for optimum placement of shoes parts templates taken into account the contour of the material to be cutted. *Nauchnye issledovaniya i razrabotki v oblasti dizajna i tekhnologii* [Scientific research and development in the field of design and technology]. Kostroma, Kostroma St. Univ. Publ., 2025. P. 363–367. (In Russ.)
2. Ivanov N. N., Liokumovich Kh. Kh. Shoe technology. Moscow, Legkaya industry Publ., 1970. 408 p. (In Russ.)
3. Lapshin V. V., Levykin M. P., Staroverov B. A., Kuznecov A. A. Development of a competitive automated cutting complex for materials. *Innovacii v tekstile, odezhde, obuvi (ICTAI-2023)* [Innovations in textiles, clothing, footwear (ICTAI-2023)]. Vitebsk, 2023. P. 44–48. (In Russ.)
4. Kuznecov A. A., Lapshin V. V., Levykin M. P., Irgasheva A. Sh. Use of modern technologies for cutting materials as part of import substitution. *Nauchnye issledovaniya i razrabotki v oblasti dizajna i tekhnologii* [Scientific research and development in the field of design and technology]. Kostroma, Kostroma St. Univ. Publ., 2023. P. 196–198. (In Russ.)
5. OpenCV machine vision software library: official website of the developers. URL: <https://opencv.org> (accessed 19.03.2025).

6. Furashova S. L., Milyushkova Yu. V. Cutting technology and the basics of rational use of materials. Vitebsk, Vitebsk. St. Tekh. Univ. Publ., 2020. 100 p. (In Russ.)
7. Dowsland K. A., Vaid S., Dowsland W. B. An algorithm for polygon placement using a bottom-left strategy. *European Journal of Operational Research*. 2002;141,2:371–381.
8. Thomas J., Chaudhari N. S. A new metaheuristic genetic-based placement algorithm for 2D strip packing. *Journal of Industrial Engineering International*. 2014;10,47:1–16.
9. Meng L., Ding L., Atli M., Khan A. M., Shan Y., Farooq M. U. Enhancing two dimensional irregular pattern packing using a modified genetic algorithm and image processing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025;155:111040.
10. Description of the SVGNest program: official website of the developers. URL: <https://svgnest.com> (accessed 21.04.2025).
11. Description of the DeepNest program: official website of the developers. URL: <https://deepnest.io> (accessed: 21.04.2025).

Статья поступила в редакцию 21.06.2025

Принята к публикации 09.09.2025