

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.91.01; 621.9.02

doi: 10.30987/2782-5957-2025-6-15-23

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИИ РАЗВЕРТКИ ПИРАМИДАЛЬНОЙ ГОФРИРОВАННОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ МЕХАНИЗМОВ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ УЗЛОВ НЕСТАНДАРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Михаил Сергеевич Елкин<sup>1✉</sup>, Антон Владимирович Кордюков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ПАО «ОДК-Сатурн», Ярославская область, Рыбинск, Россия

<sup>2</sup> Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва, Рыбинск, Россия

<sup>1</sup> mike.tanen@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6753-8750>

<sup>2</sup> kordukovant@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9734-7585>

### Аннотация

Целью данного исследования является разработка методики для автоматизированного расчета геометрии развертки пирамидальной гофрированной защиты для механизмов линейного перемещения, используемых в нестандартном оборудовании. Статья посвящена решению задачи точного построения разверток защитных гофр с различными входными и выходными сечениями, что позволяет повысить подвижность и долговечность конструкций.

Авторы применяют математические методы, включая тригонометрические зависимости и алгоритмический подход, для определения геометрических параметров развертки. Предложены конструкторско-технологические решения, такие как учет типа складки (два варианта) и способа склейки, что влияет на эксплуатационные характеристики защиты. Новизна работы заключается в разработке универсального алгоритма, позволяющего автоматизи-

ровать расчеты как для классических прямых, так и для пирамидальных гофр с переменными сечениями.

В результате исследования получены точные зависимости для построения развертки, включая координаты узловых точек, что упрощает интеграцию в CAD-системы на основании разработанного алгоритма. Опытные образцы, созданные по предложенной методике, демонстрируют высокую подвижность и соответствие заданным размерам. Выводы работы подчеркивают практическую значимость алгоритма для проектирования защитных конструкций, включая возможность использования в ЧПУ-оборудовании или для ручной разметки.

**Ключевые слова:** защита, направляющие, развертка, расчеты, робототехника, CAD-системы, геометрия складок, механизмы, перемещение, конструкторские решения.

Ссылка для цитирования:

Елкин М.С. Методика расчета геометрии развертки пирамидальной гофрированной защиты для механизмов линейного перемещения узлов нестандартного оборудования / М.С. Елкин, А.В. Кордюков // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 6. – С. 15-23. doi: 10.30987/2782-5957-2025-6-15-23.

Original article

Open Access Article

## METHOD TO CALCULATE REAMER GEOMETRY OF THE PYRAMIDAL CORRUGATED PROTECTION FOR LINEAL ACTUATORS OF NON-STANDARD EQUIPMENT UNITS

Mikhail Sergeevich Elkin<sup>1✉</sup>, Anton Vladimirovich Kordyukov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> PJSC ODK-Saturn, Yaroslavl Region, Rybinsk, Russia

<sup>2</sup> P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russia

<sup>1</sup> mike.tanen@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6753-8750>

<sup>2</sup> kordukovant@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9734-7585>

### Abstract

The study objective is to develop a method to calculate automatically the reamer geometry of the

pyramidal corrugated protection for lineal actuators used in non-standard equipment. The paper is devoted

to solving the problem of accurately constructing protective corrugations with different inlet and outlet cross-sections, which makes it possible to increase the mobility and durability of structures.

The authors apply mathematical methods, including trigonometric dependencies and an algorithmic approach to determine the geometric parameters of the reamer. Design and technological solutions are proposed, such as accounting for the type of fold (two options) and the method of gluing, which affects the operational characteristics of the protection. The novelty of the work is the development of a universal algorithm that allows automating calculations for both classical straight lines and pyramidal corrugations with variable cross sections.

*Reference for citing:*

*Elkin MS, Kordyukov AV. Method to calculate reamer geometry of the pyramidal corrugated protection for lineal actuators of non-standard equipment units. Transport Engineering. 2025;6:15-23. doi: 10.30987/2782-5957-2025-6-15-23.*

## Введение

В современных машиностроительных предприятиях все большее распространение приобретают различные средства автоматизации на основе промышленных роботов. По данным Минпромторга [1] к 2030 году для того, чтобы войти в топ-25 стран по уровню промышленной робототехники, Россия должна достигнуть показателя в 145 роботов на 10 000 человек, сейчас в нашей стране 15 роботов на 10 000 человек [2]. Расширение использования средств искусственного интеллекта в этой сфере в еще большей степени ускорит ее распространение на области ранее занятые исключительно человеком [3]. Однако помимо широко распространенных многоосевых манипуляторов, неизбежно появятся задачи по автоматизации производства, требующие нестандартных решений, специализированного оборудования. Одним из основных элементов такого оборудования, во многом определяющим его точность, производительность и долговечность, являются линейные направляющие. Защита направляющих [4, 5] от внешних воздействий – основной способ продления их ресурса, гарантия их длительной и безотказной работы. Для решения этой задачи используются различные типы защит: от тяжелых стальных телескопических до легких гофрированных конструкций. Для задач промышленной роботизации наибольшее распространение получили последние. Гофрированные защиты явля-

The study results are obtained precise dependencies for the reamer construction, including the coordinates of the unit points, which simplifies integration into CAD systems based on the developed algorithm. The prototypes created according to the proposed method demonstrate high mobility and compliance with the specified dimensions. The conclusions of the work emphasize the practical importance of the algorithm for the design of protective structures, including the possibility of use in CNC equipment or for manual marking.

**Keywords:** protection, guiding, reamer, calculations, robotics, CAD systems, fold geometry, actuators, design solutions.

ются одним из наиболее эффективных решений, обеспечивающих долговечность и точность работы оборудования [6].

В промышленности освоен и налажен выпуск гофрированных защит различных сечений: плоских; С-образных; П-образных; замкнутого профиля, ограничивающих пространство в виде параллелепипеда. При этом зачастую в защищаемых механизмах стационарная и перемещаемая части имеют различные поперечные сечения. Как правило, перемещаемая часть защиты меньше места ее присоединения к основанию. Таким образом защищаемое пространство имеет форму усеченной пирамиды. Использование гофрированной защиты постоянного сечения в данном случае приводит к ограничению свободных перемещений исполнительного органа механизма.

Большинство расчетов при выполнении проектных работ в настоящее время автоматизировано [7]. Получение развертки прямой гофрированной защиты не представляет труда и может быть выполнено построением в современных CAD системах. Существующие методы автоматизированного проектирования (CAD) не всегда учитывают особенности пирамидальных гофр [8], что ограничивает их применение. Актуальные исследования в области автоматизации проектирования защитных конструкций [9] и математического моделирования их геометрии [10]

демонстрируют необходимость разработки новых подходов к расчету разверток пирамидальных гофрированных защит.

Основные математические модели для построения гофрированных защит переменного сечения.

В настоящей статье представлены зависимости и алгоритм, позволяющие вы-

полнять автоматизированный расчет геометрии как прямых классических, так и пирамидальных защитных гофр с различным типом формы складки, от которой зависят эксплуатационные характеристики защиты. На рис. 1 представлена схема развертки пирамидальной гофры с тремя складками.

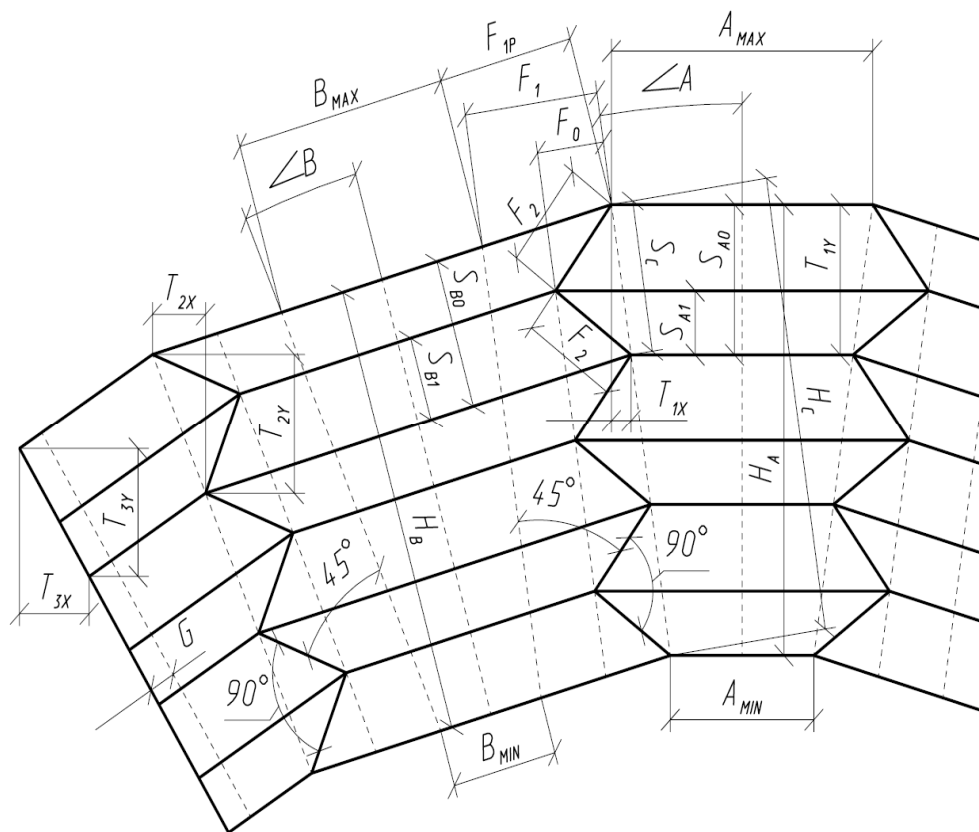


Рис. 1. Схема развертки пирамидальной гофры  
Fig. 1. Diagram of the pyramidal corrugation sweep

Исходные данные для расчета:  
 $A_{MAX}$  – длинная сторона основания, мм;  
 $B_{MAX}$  – короткая сторона основания, мм;  
 $A_{MIN}$  – длинная сторона вершины, мм;  
 $B_{MIN}$  – короткая сторона вершины, мм;  
 $H_{MAX}$  – требуемое максимальное растяжение гофры, мм;  $H_K$  – безразмерный коэффициент, определяющий запас до полного растяжения гофры, при которой ее складки исчезнут (обычно 0,25);  $G$  – величина перекрытия для склеивания гофры, определяется исходя из конструктивных соображений, мм.

Перекрытие может располагаться симметрично относительно высоты трапеции, тогда линия склеивания снаружи готовой гофры будет смещена относительно

высоты трапеции. При расположении внешней линии склеивания по центру участок перекрытия будет целиком располагаться по одну из сторон высоты трапеции. Для выбора типа склейки введём переменную ( $m$ ). При ( $m = 0$ ) по центру будет находится шов, видимый снаружи; при ( $m = 1$ ) по центру будет находится середина участка перекрытия.  $S_{A1R}$  – задаваемая конструктором ширина меньшей грани складки, на рис. 1 обозначена ( $S_{A1}$ ) мм;  $t$  – безразмерная величина 0 или 1 (0 – первый тип складки, 1 – второй тип складки).

Только при первом типе складки возможно создание гофры с различными входным и выходным сечениями. Если  $A_{MAX} \neq A_{MIN}$  и, или  $B_{MAX} \neq B_{MIN}$  то  $t =$

0. В этом случае развертка требует меньше материала, однако в эксплуатации такой тип складки показывает худшие свойства из-за повышенной деформации в узловых

точках. При проектировании гофры с равными входным и выходным сечением желательно использовать второй тип складки  $t = 1$ . На рис. 2 показаны типы складок.

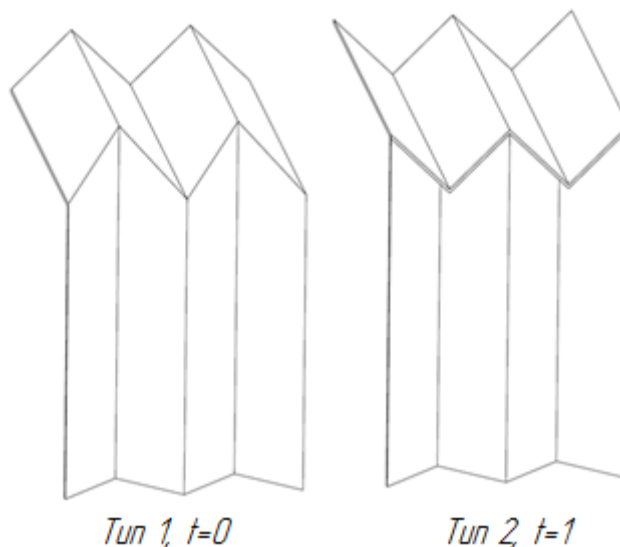


Рис. 2. Типы складок  
Fig. 2. Types of folds

Определим высоту трапеции ( $H_A$ ) с основанием ( $A_{MAX}$ )

$$H_A = H_{MAX} \times \frac{100 + H_K}{100}.$$

Определим угол ( $\angle_A$ ) между высотой и боковой стороной трапеции с основанием ( $A_{MAX}$ )

$$\angle_A = \arctan\left(\frac{A_{MAX} - A_{MIN}}{2 \times H_A}\right),$$

где  $H_A$  – длина развертки по стороне  $A$ .

Определим рекомендуемое количество складок ( $n_R$ ), исходя из желаемой ширины нижней половины складки ( $S_{A1R}$ ). Величина ( $S_{A1R}$ ) задается исходя из конструктивных соображений. Для этого выразим величину длины полной складки ( $S_C$ ) вдоль боковой стороны трапеции, а также длину полной складки ( $S_{A0}$ ) вдоль высоты трапеции

$$S_{A0} = \frac{H_A}{n},$$

$$S_C = \frac{S_{A0}}{\cos(\angle_A)}.$$

Одна полная складка формируется из двух граней, ширина меньшей ( $S_{A1}$ ), определяется по следующей зависимости.

$$S_{A1} = \frac{S_C \times \cos\left(\frac{\pi}{4} + \angle_A\right)}{\sqrt{2}}.$$

Подставив ( $S_C$ ) и выразив ( $S_{A0}$ ), получим

$$S_{A0} = \sqrt{2} \times \cos(\angle_A) \times \frac{S_{A1}}{\cos\left(\frac{\pi}{4} + \angle_A\right)}.$$

Приравняем данное выражение к ранее найденному выражению ( $S_{A0}$ ), заменим ( $S_{A1}$ ) на ( $S_{A1R}$ ) выразим ( $n$ ), оно же ( $n_R$ ), оптимальное количество складок:

$$n_R = \frac{H_A \times \cos\left(\frac{\pi}{4} + \angle_A\right)}{\sqrt{2} \times S_{A1R} \times \cos(\angle_A)}.$$

После округления полученной величины ( $n_R$ ) до ближайшего целого, получаем количество складок ( $n$ ) для дальнейших расчетов.

Повторим расчеты по ранее полученным формулам, определим ширину полной складки ( $S_{A0}$ ) вдоль высоты трапеции с основанием ( $A_{MAX}$ ), длину полной складки ( $S_C$ ) вдоль боковой стороны трапеции, а также ширину нижней половины складки ( $S_{A1}$ ):

$$S_{A0} = \frac{H_A}{n},$$

$$S_C = \frac{S_{A0}}{\cos(\angle_A)},$$

$$S_{A1} = \frac{S_C \times \cos\left(\frac{\pi}{4} + \angle_A\right)}{\sqrt{2}}.$$

Определим длину ( $H_C$ ) боковой стороны трапеции с основанием ( $A_{MAX}$ ), она же является боковой стороной трапеции с основанием ( $B_{MAX}$ )

$$H_C = \frac{H_A}{\cos(\angle_A)}.$$

Определим высоту трапеции с основанием ( $B_{MAX}$ );

$$H_B = \sqrt{H_C^2 - \left(\frac{B_{MAX} - B_{MIN}}{2}\right)^2},$$

где  $H_B$  – длина развертки по стороне  $B$ , мм.

Определим угол ( $\angle_B$ ) между высотой и боковой стороной трапеции с основанием ( $B_{MAX}$ )

$$\angle_B = \arctan\left(\frac{B_{MAX} - B_{MIN}}{2 \times H_B}\right).$$

Определим ширину полной складки ( $S_{B0}$ ) вдоль высоты трапеции с основанием ( $B_{MAX}$ ).

$$S_{B0} = \frac{H_B}{n}.$$

Определим ширину нижней половины складки трапеции с основанием ( $B_{MAX}$ ).

$$S_{B1} = \frac{S_C \times \sin\left(\frac{\pi}{4} + \angle_B\right)}{\sqrt{2}}.$$

Высота треугольника сгиба складки ( $F_0$ )

$$F_0 = \frac{S_C}{2}.$$

Ширина участка ( $F_1$ ) угловой складки, определяемая в зависимости от типа складки ( $t$ ), находится по следующей зависимости:

$$F_1 = F_0 \times (t + 1).$$

Для геометрического построения разметки данных расчетов достаточно, однако в случае автоматизированного построения требуется получение зависимостей для каждой узловой точки. Точки изображены на рис. 3.

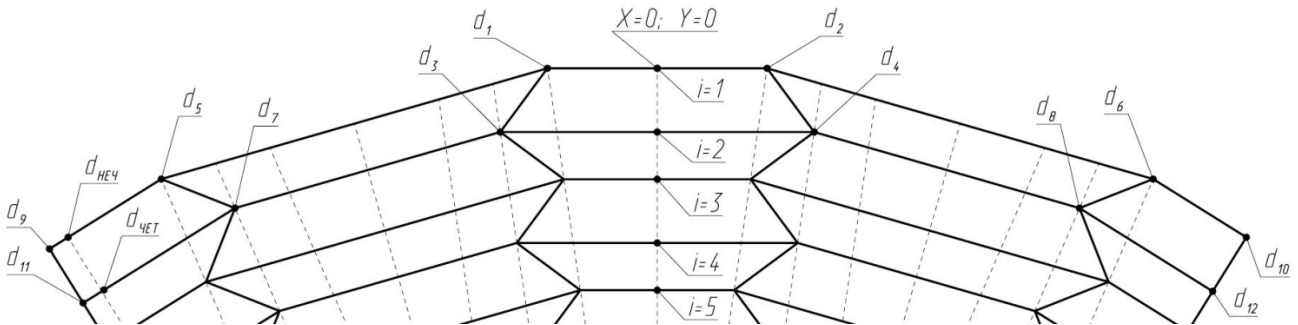


Рис. 3. Схема развертки с точками

Fig. 3. The scan diagram with dots

Можно заметить, что в пределах каждой трапеции (центральной по стороне ( $A$ ), боковых по стороне ( $B$ ), и половин центральной) подобные узловые точки смещаются на одинаковые шаги при переходе между линиями сгибов. Введем параметр  $i$ , определяющий номер сгиба при отсчёте от начала координат. Таким образом, для получения координат всех точек развертки, достаточно определить координаты первой нечетной ( $i = 1$ ) линии сгиба и первой четной ( $i = 2$ ), определить координаты нижележащих линий сгиба путем смещения полученных координат на опре-

делённые шаги по осям  $X$  и  $Y$ . Определим абсолютные величины данных шагов для точек центральной трапеции с основанием ( $A_{MAX}$ )

$$T_{1X} = \frac{A_{MAX} - A_{MIN}}{2 \times n};$$

$$T_{1Y} = S_{A0}.$$

Для боковых трапеций с основанием ( $B_{MAX}$ ):

$$T_{2X} = S_C \times \sin(\angle_A + 2 \times \angle_B);$$

$$T_{2Y} = S_C \times \cos(\angle_A + 2 \times \angle_B).$$

Для половин трапеции с основанием ( $A_{MAX}$ ):

$$T_{3X} = S_{A0} \times \sin(2 \times (\angle_A + \angle_B)) ;$$

$$T_{3Y} = S_{A0} \times \cos(2 \times (\angle_A + \angle_B)) .$$

Определим координаты точек  $(d_1)$ ,  $(d_2)$ :

$$d_{1X}(i) = -\frac{A_{MAX}}{2} + \frac{T_{1X} \times (i-1)}{2} ,$$

$$d_{1Y}(i) = -\frac{T_{1Y} \times (i-1)}{2} ,$$

$$d_{2X}(i) = -d_{1X} ,$$

$$d_{2Y}(i) = d_{1Y} .$$

Определим координаты точки  $(d_5)$ ,  $(d_6)$ . Для этого спроецируем ширину пространства угловой складки  $(F_1)$  на ось параллельную основанию трапеции  $(B_{MAX})$ , получим величину  $(F_{1P})$ .

$$F_{1P} = \frac{F_1}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \angle_B\right)} .$$

Координаты точек  $(d_5)$ ,  $(d_6)$

$$d_{5X}(i) = -\left(\frac{A_{MAX}}{2} + (2 \times F_{1P} + B_{MAX}) \times \cos(\angle_A + \angle_B)\right) + \frac{T_{2X} \times (i-1)}{2} ,$$

$$d_{5Y}(i) = -(2 \times F_{1P} + B_{MAX}) \times \sin(\angle_A + \angle_B) - \frac{T_{2Y} \times (i-1)}{2} ,$$

$$d_{6X}(i) = -d_{5X} ,$$

$$d_{6Y}(i) = d_{5Y} .$$

Определим координаты точки  $(d_3)$ ,  $(d_4)$ . Для этого выразим длину углового сгиба  $(F_2)$ .

$$F_2 = \frac{S_C}{\sqrt{2}} .$$

Координаты точек  $(d_3)$ ,  $(d_4)$ :

$$d_{3X}(i) = -\left(\frac{A_{MAX}}{2} + F_2 \times \cos\left(\angle_A + \frac{\pi}{4}\right)\right) + \frac{T_{1X} \times (i-2)}{2} ,$$

$$d_{3Y}(i) = -\frac{S_{A0} \times i}{2} + S_{A1} ,$$

$$d_{4X}(i) = -d_{3X} ,$$

$$d_{4Y}(i) = d_{3Y} .$$

Координаты точек  $(d_7)$ ,  $(d_8)$

$$d_{7X}(i) = -\left(\frac{A_{MAX}}{2} + (2 \times F_{1P} + B_{MAX}) \times \cos(\angle_A + \angle_B)\right) + F_2 \times \cos\left(\frac{\pi}{4} - \angle_A - 2 \times \angle_B\right) + \frac{T_{2X} \times (i-2)}{2} ,$$

$$d_{7Y}(i) = -(2 \times F_{1P} + B_{MAX}) \times \sin(\angle_A + \angle_B) - F_2 \times \sin\left(\frac{\pi}{4} - \angle_A - 2 \times \angle_B\right) - \frac{T_{2Y} \times (i-2)}{2} ,$$

$$d_{8X}(i) = -d_{7X} ,$$

$$d_{8Y}(i) = d_{7Y} .$$

Следующие точки зависят от типа склейки  $(m)$  и величины перекрытия краев  $(G)$  при склеивании трапеции. Определим координаты точек пересечения высоты

разделенной трапеции с нечетными и четными линиями сгибов слева от общей оси  $X$ .

$$d_{X_{\text{неч}}}(i) = -\left((2 \times F_{1P} + B_{MAX}) \times \cos(\angle_A + \angle_B) + \frac{A_{MAX}}{2}\right) - \frac{A_{MAX} \times \cos(2 \times (\angle_A + \angle_B))}{2} + \frac{T_{3X} \times (i-1)}{2} ,$$

$$\begin{aligned}
d_{Y\text{неч}}(i) &= -((2 \times F_{1P} + B_{MAX}) \times \sin(\angle_A + \angle_B)) - \frac{A_{MAX} \times \sin(2 \times (\angle_A + \angle_B))}{2} \\
&\quad - \frac{T_{3Y} \times (i - 1)}{2}, \\
d_{X\text{чет}}(i) &= -\left((2 \times F_{1P} + B_{MAX}) \times \cos(\angle_A + \angle_B) + \frac{A_{MAX}}{2}\right) - \frac{A_{MAX} \times \cos(2 \times (\angle_A + \angle_B))}{2} \\
&\quad + (S_{A0} - S_{A1}) \times \sin(2 \times (\angle_A + \angle_B)) + \frac{T_{3X} \times (i - 2)}{2}, \\
d_{Y\text{чет}}(i) &= -((2 \times F_{1P} + B_{MAX}) \times \sin(\angle_A + \angle_B)) - \frac{A_{MAX} \times \sin(2 \times (\angle_A + \angle_B))}{2} - (S_{A0} - S_{A1}) \\
&\quad \times \cos(2 \times (\angle_A + \angle_B)) - \frac{T_{3Y} \times (i - 2)}{2}.
\end{aligned}$$

Для получения координат крайних точек  $(d_9)$ ,  $(d_{10})$ ,  $(d_{11})$ ,  $(d_{12})$  необходимо к ранее полученным координатам добавить

величину проекции перекрытия на ось X и Y соответственно.

$$\begin{aligned}
d_{9X}(i) &= d_{X\text{неч}}(i) - \left(G - \frac{m \times G}{2}\right) \times \cos(2 \times (\angle_A + \angle_B)), \\
d_{9Y}(i) &= d_{Y\text{неч}}(i) - \left(G - \frac{m \times G}{2}\right) \times \sin(2 \times (\angle_A + \angle_B)), \\
d_{10X}(i) &= -d_{X\text{неч}}(i) + \frac{m \times G}{2} \times \cos(2 \times (\angle_A + \angle_B)), \\
d_{10Y}(i) &= d_{Y\text{неч}}(i) - \frac{m \times G}{2} \times \sin(2 \times (\angle_A + \angle_B)), \\
d_{11X}(i) &= d_{X\text{чет}}(i) - \left(G - \frac{m \times G}{2}\right) \times \cos(2 \times (\angle_A + \angle_B)), \\
d_{11Y}(i) &= d_{Y\text{чет}}(i) - \left(G - \frac{m \times G}{2}\right) \times \sin(2 \times (\angle_A + \angle_B)), \\
d_{12X}(i) &= -d_{X\text{чет}}(i) + \frac{m \times G}{2} \times \cos(2 \times (\angle_A + \angle_B)), \\
d_{12Y}(i) &= d_{Y\text{чет}}(i) - \frac{m \times G}{2} \times \sin(2 \times (\angle_A + \angle_B)).
\end{aligned}$$

## Обсуждение и результаты

Выполнение расчетов по данным зависимостям позволяет получить разметку для развертки гофрированной защиты, что существенно упрощает разработку конструкций с их применением. Для автоматизации вышеприведенных расчетов с возможностью включения их в CAD систему, разработаем следующий алгоритм:

1. Блок «НАЧАЛО». Вводим исходные данные  $A_{MAX}$ ;  $B_{MAX}$ ;  $A_{MIN}$ ;  $B_{MIN}$ ;  $H_{MAX}$ ;  $H_K$ ;  $G$ ;  $S_{AIR}$ ;  $t$ ,  $m$ .

2. Проверяем, если  $A_{MAX} \neq A_{MIN}$  и, или  $B_{MAX} \neq B_{MIN}$ , а  $t = 1$ , выдаем предупреждение о том, что построение невозможно, требуется изменить исходные данные. Если условие не выполняется переходим к расчету.

3. Рассчитываем  $n_R$ , округляем до ближайшего целого  $n$ .

4. Инициализируем счетчик цикла  $i$  значением 1.

5. Вычисляем максимальное значение счетчика  $i_{\max} = 2n + 1$ .

6. Входим в цикл по  $i$ .

6.1. Вычисляем координаты точек верхнего нечетного ряда  $d_9$ ,  $d_5$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_6$ ,  $d_{10}$  для текущего  $i$ .

6.2. Соединяем линиями точки  $d_9$ - $d_5$ ,  $d_5$ - $d_1$ ,  $d_1$ - $d_2$ ,  $d_2$ - $d_6$ ,  $d_6$ - $d_{10}$ .

6.3. Увеличиваем счетчик  $i$  на 1.

6.4. Вычисляем координаты точек четного ряда  $d_{11}$ ,  $d_7$ ,  $d_3$ ,  $d_4$ ,  $d_8$ ,  $d_{12}$ .

6.5. Соединяем линиями точки  $d_{11}$ - $d_7$ ,  $d_7$ - $d_3$ ,  $d_3$ - $d_4$ ,  $d_4$ - $d_8$ ,  $d_8$ - $d_{12}$ .

6.6. Соединяем линиями точки нечетного ряда (6.1) и четного ряда (6.4)  $d_9-d_{11}$ ,  $d_5-d_7$ ,  $d_1-d_3$ ,  $d_2-d_4$ ,  $d_6-d_8$ ,  $d_{10}-d_{12}$ .

6.7. Увеличиваем счетчик  $i$  на 1.

6.8. Вычисляем координаты точек нижнего нечетного ряда  $d_9$ ,  $d_5$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_6$ ,  $d_{10}$  для текущего  $i$ .

6.9. Соединяем линиями точки  $d_9-d_5$ ,  $d_5-d_1$ ,  $d_1-d_2$ ,  $d_2-d_6$ ,  $d_6-d_{10}$ .

## Выводы

Таким образом, был разработан и реализован алгоритм для расчета и построения разверток гофрированных защит, имеющих различные размеры входного и выходного сечения с возможностью построения классических прямых гофрированных защит с двумя типами складок. Опытные развертки, полученные по данному алгоритму, после формирования

6.10. Соединяем линиями точки четного ряда (6.4) и нечетного ряда (6.8)  $d_{11}-d_9$ ,  $d_7-d_5$ ,  $d_3-d_1$ ,  $d_4-d_2$ ,  $d_8-d_6$ ,  $d_{12}-d_{10}$ .

6.11. Проверяем условие, ЕСЛИ  $i < i_{\max}$ , то увеличиваем счетчик на 1 и возвращаемся к началу цикла. Если  $i = i_{\max}$  выходим из цикла.

7. После завершения цикла переходим к блоку «КОНЕЦ».

имеют отличную подвижность и точность заданных размеров. Экспорт геометрии разверток в специализированные постпроцессоры позволит использовать ее в качестве основы для создания управляющей программы для оборудования ЧПУ или использовать распечатанный шаблон на бумаге для ручной разметки и раскроя будущего изделия.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Минпромторг разрабатывает единый стандарт ПО для роботов с «Яндексом» и «Сбером» // Forbes. – 2024. – 29 мая. – URL: <https://www.forbes.ru/tekhnologii/533648-minpromtorg-razrabatyvaet-edinyj-standart-po-dla-robotov-s-andeksom-i-sberom> (дата обращения: 01.02.2025).
2. Ермолов И. Л. О роли промышленной робототехники в развитии промышленности России // Инновации. 2019. № 10 (252). С. 45-52.
3. Жилина И. Ю. Мировой рынок робототехники: состояние и перспективы // Социальные и гуманитарные науки: Отечественная и зарубежная литература. Сер. 2, Экономика: Реферативный журнал. 2020. № 1. С. 78-92.
4. Лаврентьев А. Ю., Какорин Д. Д., Дожделев А. М. Защита направляющих и ходовых винтов установок для аддитивного производства деталей // Современные материалы, техника и технологии. 2021. № 6 (39). С. 34-41.
5. Иванов А. В., Петров С. К. Современные методы автоматизации проектирования в машиностроении // Инженерный вестник. 2023. № 4 (12). С. 56-67. - URL: [https://eng-](https://eng-vestnik.ru/2023/04/56-67)

- [vestnik.ru/2023/04/56-67](https://eng-vestnik.ru/2023/04/56-67) (дата обращения: 11.05.2025).
6. Сидорова Е. Л. Гофрированные защиты для промышленных роботов: анализ конструкций и материалов // Робототехника и автоматизация. 2022. № 3. С. 34-45.
7. Кудояров Р. Г., Дурко Е. М., Иванов Д. В. Автоматизация проектирования мехатронного станочного оборудования // Вестник УГАТУ. 2007. № 1. С. 112-120.
8. Кузнецов Д. М., Федорова Н. А. CAD-системы в проектировании защитных механизмов: учебное пособие. М.: Техносфера, 2021. 210 с.
9. Смирнов В. Г. Автоматизация проектирования гофрированных защит в машиностроении // Современные технологии машиностроения. 2024. № 3. С. 88-97. - URL: <https://stm-journal.ru/2024/03/88-97> (дата обращения: 11.05.2025).
10. Белов А. Н., Карпов М. И. Математическое моделирование геометрии складчатых структур для защитных механизмов // Прикладная механика и техническая физика. - 2023. Т. 64, № 2. С. 145-156. - DOI: 10.15372/PMTF20230212.

## REFERENCES

1. The Ministry of Industry and Trade is developing a unified software standard for robots with Yandex and Sberbank [Internet]. Forbes; 2024 May 29 [cited 2025 Jan 02]. Available from: <https://www.forbes.ru/tekhnologii/533648-minpromtorg-razrabatyvaet-edinyj-standart-po-dla-robotov-s-andeksom-i-sberom>.

2. Ermolov IL. On the role of industrial robotics in the development of industry in Russia. Innovations. 2019;10(252):45-52.
3. Zhilina IYu. Global robotics market: state and prospects. Social and Humanitarian Sciences: domestic and foreign literature. Economics. 2020;1:78-92.
4. Lavrentiev AYU, Kakorin DD, Dozhdelev AM. Protection of guide rails and lead screws of installa-



- tions for additive manufacturing of parts. *Sovremennye Materialy, Tekhnika I Tekhnologii*. 2021;6(39):34-41.
5. Ivanov AV, Petrov SK. Modern methods of design automation in mechanical engineering. *Inzhenerny Vestnik* [Internet]. 2023 [cited 2025 Nov 05];4(12):56-67. Available from: <https://eng-vestnik.ru/2023/04/56-67>.
  6. Sidorova EL. Corrugated protection for industrial robots: analysis of structures and materials. *Robototekhnika I Avtomatizatsiya*. 2022;3:34-45.
  7. Kudoyarov RG, Durko EM, Ivanov DV. Automation of design of mechatronic machine tools. *Vestnik UGATU*. 2007;1:112-120.

8. Kuznetsov DM, Fedorova NA. CAD systems in the design of protective mechanisms: textbook. Moscow: Technosphere; 2021.
9. Smirnov VG. Automation of the design of corrugated shields in mechanical engineering. *Modern Engineering Technologies* [Internet]. 2024 [cited 2025 Nov 05];3:88-97. Available from: <https://stm-journal.ru/2024/03/88-97>.
10. Belov AN, Karpov MI. Mathematical modeling of the geometry of folded structures for protective mechanisms. *Jour of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2023;64(2):145-156. DOI: 10.15372/PMTF20230212.

#### **Информация об авторах:**

**Елкин Михаил Сергеевич**, – кандидат технических наук, ПАО ОДК «Сатурн», начальник отдела механизации и автоматизации, тел. +7-915-980-53-32.

**Elkin Mikhail Sergeevich** – Candidate of Technical Sciences, PJSC ODK Saturn, Head of the Department of Mechanization and Automation, phone: +7-915-980-53-32.

**Кордюков Антон Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Инновационное машиностроение» РГТУ им. П.А. Соловьёва, тел. +7-902-227-53-45.

**Kordyukov Anton Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Innovative Mechanical Engineering at P.A. Solovyov Russian State Technical University, phone: +7-902-227-53-45.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 04.04.2025; одобрена после рецензирования 20.05.2025; принята к публикации 26.05.2025. Рецензент – Петрешин Д.И., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 04.04.2025; approved after review on 20.05.2025; accepted for publication on 26.05.2025. The reviewer is Petreshin D.I., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**