

УДК 535.214.6

## БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМА ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ КООРДИНАТНЫХ ОСЕЙ МНОГОКООРДИНАТНОЙ МАШИНЫ СКОРОСТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

**Белый Вячеслав Сергеевич,**

кандидат технических наук,

доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева», г. Москва, el.belaya2015@yandex.ru

### Аннотация

В настоящей научной статье предлагается общая структура математического обеспечения специализированного контроллера модернизированной многокоординатной машины скоростной лазерной резки, осуществляющего управление процессом относительного движения кинематических координатных осей машины, составляющих базовую основу структуры её координатных столов. Кроме того, представлена блок-схема алгоритма синхронного управления основными и дополнительными кинематическими осями, обеспечивающий разложение сложного движения на основные и дополнительные оси с целью повышения скорости процесса лазерной резки.

**Ключевые слова:** лазерная резка, математическое обеспечение, координатный стол, блок-схема алгоритма, скорость резки, лазерные технологии, многокоординатная машина, кинематическая ось.

## BLOCK DIAGRAM OF THE ALGORITHM OF RELATIVE MOTION OF KINEMATIC COORDINATE AXES OF A MULTI-COORDINATE HIGH- SPEED LASER CUTTING MACHINE

**Vyacheslav S. Bely,**

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Physics of the D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Moscow

### ABSTRACT

This scientific article proposes a general structure of mathematical support for a specialized controller of a modernized multi-coordinate high-speed laser cutting machine, which controls the process of relative motion of the kinematic coordinate axes of the machine, which form the basic basis of the structure of its coordinate tables. In addition, a block diagram of the algorithm for

synchronous control of the main and additional kinematic axes is presented, which provides the decomposition of complex motion into main and additional axes in order to increase the speed of the laser cutting process.

---

**Keywords:** laser cutting, mathematical support, coordinate table, algorithm flowchart, cutting speed, laser technologies, multi-coordinate machine, kinematic axis.

---

**Введение.** Современные лазерные технологии требуют разработки всё более нового технологического оборудования, а также управляющего последним программного обеспечения. Современная многокоординатная машина скоростной лазерной резки (ЛР) представляет собой промышленный технологический комплекс, основными элементами которого являются координатный стол, лазер, контроллер и компьютер, обеспечивающий функционирование автоматизированной системы управления технологическим процессом [9, с. 45]. Динамические характеристики существующих в настоящее время промышленных технологических комплексов с одним массивным координатным столом не позволяют использовать все потенциальные возможности современных лазеров для создания высокоэффективных лазерных технологий. Лазер позволяет реализовывать высокие скорости процесса ЛР, но традиционная кинематическая схема установки не способна их обеспечить. Простые кинематические системы, где координатный стол имеет две степени свободы, не позволяют достигать требуемых высоких скоростей ЛР [10, с. 18-19]. При увеличении скорости ЛР с использованием простых систем значительно ухудшается качество выполнения деталей. В силу инерционности массивного координатного стола для обеспечения требуемых скоростей и ускорений в процессе обработки требуются мощные приводы двигателей. Кроме того, координатный стол установки не может быстро тормозить, что приводит к пережиганию поверхности обрабатываемого материала. Для увеличения скорости ЛР необходимо увеличивать мощность двигателей, а это обстоятельство ведет к увеличению массы и габаритных размеров установок. Увеличение массы установки приводит к резким возрастаниям колебаний координатного стола, что порождает новую серьёзную проблему предотвращения процессов возникновения вибраций установки при её технической реализации. Приведенные противоречия порождают научную проблему поиска альтернативного способа увеличения скорости ЛР. Для решения такой проблемы предлагается добавление в состав многокоординатной машины скоростной ЛР координатного стола с дополнительными кинематическими осями. Данная идея предопределяет, цель научной статьи – исследование теоретической возможности технической и программной реализации оговоренного выше проекта конструкторского решения. Данная цель достигается путём решения двух взаимосвязанных между собой научных задач:

1. Разработка блок-схемы алгоритма «сглаживания» траектории ЛР для синхронного управления основными и дополнительными кинематическими осями, обеспечивающего разложение сложного движения на основные и дополнительные оси с целью повышения скорости процесса.

2. Разработка обобщённой структурной схемы математического обеспечения специализированного контроллера модернизированной многокоординатной машины скоростной ЛР, осуществляющего управление процессом относительного движения кинематических координатных осей машины, составляющих базовую основу структуры её координатных столов.

Методическим инструментарием для проведения исследования являются положения и нормы, достаточно чётко и подробно описанные в [1, с. 582-591], [2, с. 64-76], [3, с. 443-451], а также в [4, с. 100-112]. Данная научная методика успешно реализована в трудах [5, с. 155-166], [6, с. 138-148], [7, с. 443-451] и [8, с. 575-581] в ходе исследования различных процессов, в том числе и не имеющих тесной взаимосвязи с процессами скоростной ЛР.

**Анализ состояния вопроса.** ЛР, как механический процесс, характеризуется отсутствием механического воздействия на обрабатываемый материал. Как в процессе ЛР, так и после ее завершения, возникают минимальные деформации поверхности обрабатываемых материалов. Именно поэтому ЛР легкодеформируемых и нежестких заготовок и деталей осуществляется с высокой точностью. С удвоенным по модулю ускорением стандартных производственных установок и инновационными техническими решениями, позволяющими устранить вибрацию и сочетать максимальную производительность с максимальной эффективностью – это гигантский скачок вперед в развитии лазерных установок.

В работе [10, с. 47] предлагается алгоритм синхронного управления такой установкой и его программная реализация. Суть алгоритма состоит в разложении сложного движения на основные и дополнительные координатные оси. В итоге обеспечивается суммарное результирующее движение источника лазерного излучения вдоль траектории с постоянной контурной скоростью. Основное достоинство машины с дополнительными кинематическими осями заключается в возможности совершения локальных ускорений за счет дополнительного координатного стола. В результате основной стол не испытывает резких ускорений, его движение практически прямолинейное и описывает основной контур заготовки. На сложных участках, где имеют место острые углы и (или) крутые дуги, в работу включается дополнительный стол, способный быстро проходить эти участки [11, с. 44-45].

В отличие от [11] в настоящей научной статье предложен новый алгоритм – алгоритм «сглаживания» траектории для синхронного управления основными и дополнительными кинематическими осями, обеспечивающий разложение сложного движения на основные и дополнительные оси.

**Постановка задачи.** Формально задачи разработки алгоритма «сглаживания» траектории для синхронного управления основными и дополнительными кинематическими осями, и определения кинематических параметров сложного движения основных и дополнительных осей сводится к определению скоростей  $V_{I,i}$ ,  $V_{II,i}$  и ускорений  $a_{I,i}$ ,  $a_{II,i}$  движения вышеуказанных осей после разделения траекторий их движения  $S$  на составляющие: для основного координатного стола  $S_1$  и дополнительного  $S_2$ . Определение значений искомых кинематических параметров осуществляется по известным значениям контурной скорости  $V_k$  движения оси и критического угла  $\alpha$  между двумя соседними отрезками путём корректного использования математического аппарата, достаточно чётко и подробно изложенного в [13, с. 140-145] и [14, с. 152-155].

Суть алгоритма заключается в том, чтобы преобразовать траекторию таким образом, чтобы она складывалась из траектории движения большого стола и траектории движения малого стола. Законы Ньютона сформулированы для движения точки по отношению к инерциальным системам отсчета. Для определения кинематических параметров точки при движении относительно произвольно движущейся системы отсчета используется теоретическое описание сложного движения. Сложным называют движение точки по отношению к двум или нескольким системам отсчета.

Движение точки  $M$  по отношению к подвижной системе отсчета называют относительным движением. Движение той точки подвижной системы отсчета, в которой в

данный момент находится движущаяся точка, по отношению к неподвижной системе отсчета называют переносным движением. Движение точки  $M$  по отношению к неподвижной системе отсчета называют абсолютным движением. По аналогии с этими определениями называются относительные, переносные и абсолютные скорости и ускорения точки. На рисунке 1 «а» показан квадрат, вращающийся в плоскости чертежа вокруг неподвижной точки. По стороне квадрата движется точка  $M$ . Она участвует в двух движениях, поэтому можно ввести две системы отсчета: неподвижную, например,  $O_1x_1y_1z_1$  – по отношению к которой вращается квадрат и подвижную  $Oxyz$ , скрепленную с квадратом, по оси  $Oy$  которой движется точка  $M$ , как показано на рисунке 1 «б».

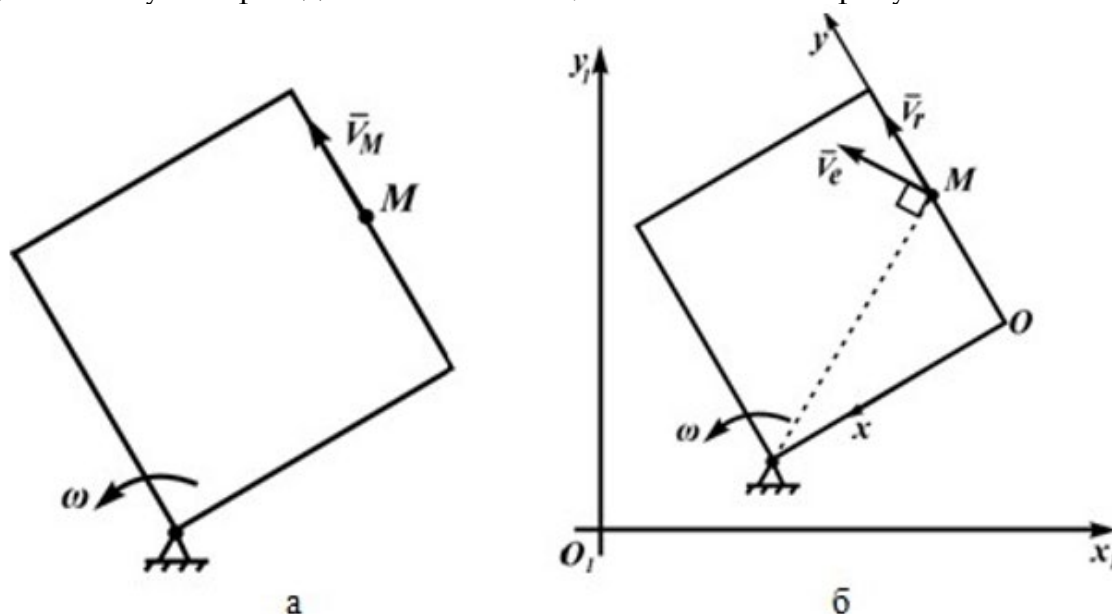


Рисунок 1. – Сложное движение точки  $M$ .

Движение точки  $M$  по стороне квадрата (по оси  $Oy$  скрепленной с квадратом подвижной системы) является относительным – скорость в этом движении  $V_r$ . Вращение точки  $M$  вместе с квадратом – переносное движение, скорость в этом движении –  $V_e$ .

Абсолютное движение является результатом сложения переносного и относительного движений. Абсолютная скорость точки определяется как геометрическая сумма переносной и относительной скоростей:

$$\vec{V} = \vec{V}_e + \vec{V}_r. \quad (1)$$

В выражении (1):

$\vec{V}_e$  – вектор переносной скорости точки;

$\vec{V}_r$  – вектор относительной скорости точки.

Каждое слагаемое в этой формуле определяется независимо друг от друга, исходя из соответствующего закона движения. В примере на рисунке 1 относительная скорость  $V_r$  определяется с учетом закона движения точки по оси  $Oy$ . Переносная скорость определится как скорость точки  $M$  при вращении вместе с квадратом вокруг оси его вращения. Величина абсолютной скорости может быть определена с помощью теоремы косинусов:

$$V = \sqrt{V_e^2 + V_r^2 - 2 \cdot V_e \cdot V_r \cdot \cos \alpha}. \quad (2)$$

Для определения вектора абсолютной скорости можно равенство (1) спроецировать на выбранные оси координат, найти проекции абсолютной скорости, её величину и направляющие косинусы, то есть определить углы, которые вектор скорости составляет с выбранными осями.

Ускорение точки определяется как сумма трех ускорений: переносного, относительного и поворотного (кориолисова):

$$\vec{a} = \vec{a}_e + \vec{a}_r + \vec{a}_k. \quad (3)$$

Первые два слагаемые этой формулы определяются из соответствующих законов переносного и относительного движений. В случае неравномерных криволинейных движений эта формула имеет вид:

$$\vec{a} = \vec{a}_e^n + \vec{a}_e^t + \vec{a}_r^n + \vec{a}_r^t + \vec{a}_k.$$

Кориолисово ускорение определяется по формуле

$$\vec{a}_k = 2 \cdot \vec{\omega}_e \times \vec{V}_r. \quad (4)$$

Величина этого ускорения

$$\vec{a}_k = 2 \cdot \omega_e \cdot V_r \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – угол между векторами переносной угловой и линейной относительной скоростями.

Суть алгоритма относительного движения основных и дополнительных координатных осей заключается в преобразовании траектории так, чтобы она складывалась из траектории движения большого и малого столов. В данной научной статье предлагается алгоритм сглаживания траектории для реализации описанного подхода. В принятой упрощенной модели на основной координатный стол устанавливается точечный дополнительный координатный стол, Блок-схема алгоритма, описывающего кинематическую модель проектируемой лазерной технологической установки с дополнительными кинематическими осями представлен на рисунке 2.

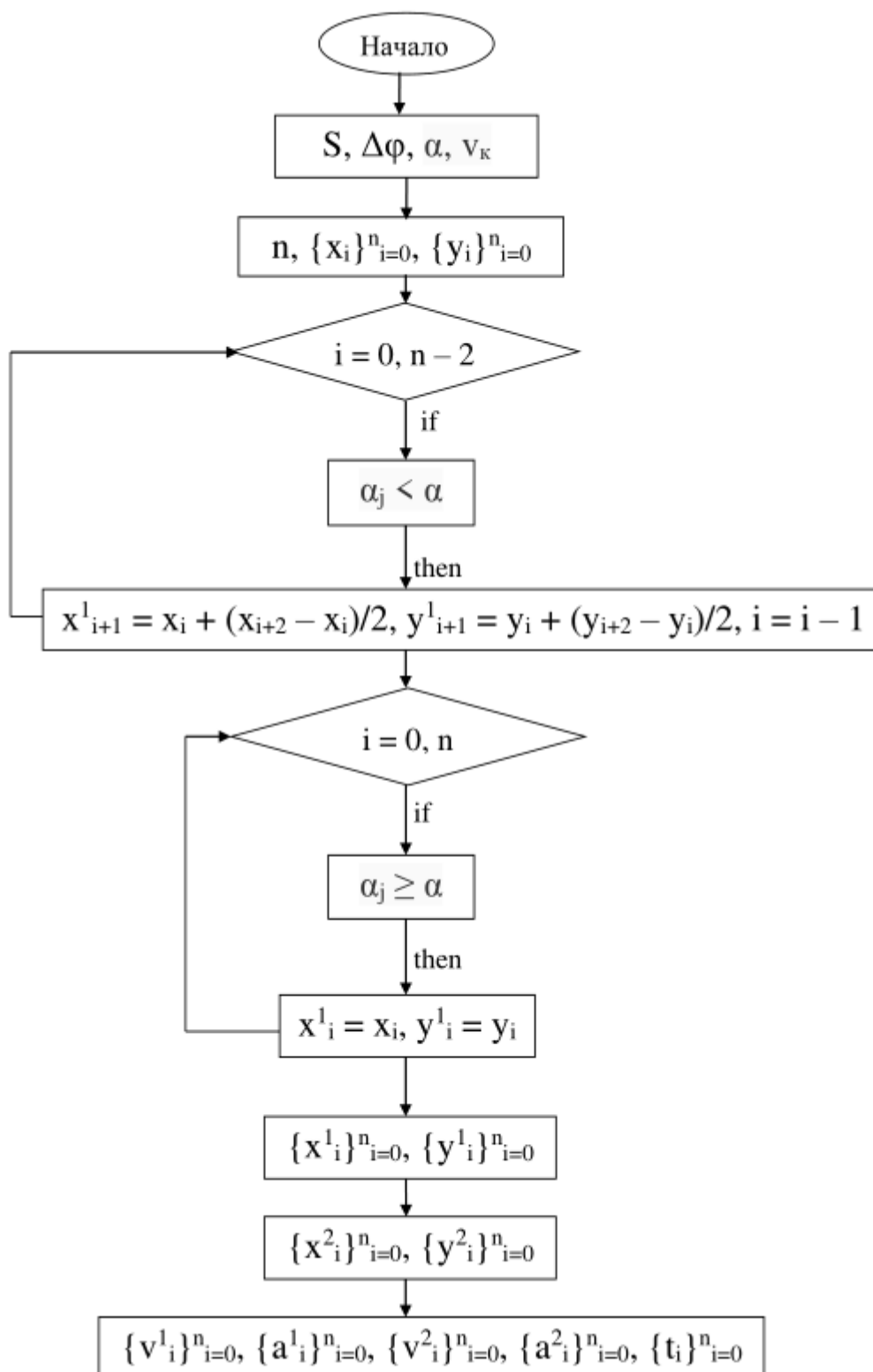


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма

Предложенный алгоритм сглаживания траектории может быть положен в основу программы для лазерной технологической установки с дополнительными кинематическими осями. Программа может быть создана для предварительной обработки чертежа детали до начала технологического процесса ЛР.

В программе могут быть реализованы дополнительные функции:

1. Возможность загрузки внешних файлов. Это открытый формат файлов для обмена графической информацией между приложениями системы автоматизированного проектирования, который поддерживается практически всеми САД-системами. Эти файлы могут представлять собой текстовый документ, в который занесены все кривые чертежа в виде чисел. Программа последовательно считывает эти данные и сохраняет в памяти для дальнейшего использования. Поскольку алгоритм рассчитан на работу с точками, программа раскладывает все элементы контура на точки. Точность такого разложения выбирается пользователем.
2. Возможность работы с неограниченным количеством контуров в одном чертеже.
3. Реализация автоматической проверки всех контуров на замкнутость и отсутствие пересечений контуров.
4. Возможность выбора пользователем точности разбиения контуров и необходимую степень сглаживания.

Входными данными для программы является чертеж заготовки, точность его разбиения и степень сглаживания, а также контурная скорость. После загрузки данных в программу, программа их анализирует, выполняя следующие действия:

1. Обработка сложных участков, требующих больших ускорений. Программа сглаживает острые углы, крутые дуги т.п. На выходе рассчитываются траектории основной оси – они гладкие, не требующие резких изменений скорости и ускорения, и дополнительной оси – они являются дополнением к плавным траекториям основной оси.
2. Расчет кинематических параметров для основной и дополнительной оси. Дополнительная ось имеет очень большие ускорения и торможения, совершает резкие изменения скорости на сложных участках.

Структурная схема математического обеспечения специализированного контроллера представлена на рисунке 2.



Рисунок 2. – Структурная схема математического обеспечения специализированного контроллера.

Ограничения, используемые в программе:

1. Ускорения основной оси не более 0,5g. Очень сложно изменять скорость массивного основного координатного стола.
2. Контурная скорость на всех участках должна быть постоянна. Это обуславливается тем, что мощность лазера достаточно велика, и любые задержки и остановки существенно влияют на качество получаемой заготовки. Возможен пережог материала, что совершенно недопустимо.

Выходными данными программы может быть таблица, в которой отражены все необходимые параметры осей – координаты перемещений, скорости, ускорения, временные отметки и изображение движений основной и дополнительной координатных осей, а также их результирующая траектория.

Анализ алгоритма и структуры математического обеспечения показывает:

- алгоритм может обеспечить сглаживание углов, а траектория для основного координатного стола становится плавной, что позволяет ему не испытывать резких ускорений и торможений.

- использование дополнительных осей позволяет уменьшить ускорение основного стола. В результате движение большого стола становится плавным и почти равномерным.
- дополнительный координатный стол может иметь большие значения ускорения на сложных участках. Дополнительные оси компенсируют инерцию основного стола и быстро обрабатывает сложные участки.
- имеет место факт наличия постоянства контурной скорости.

**Выводы:** Таким образом, цель исследования в настоящей научной статье достигнута путём решения двух взаимосвязанных между собой научных задач:

1. Разработана блок-схема алгоритма «сглаживания» траектории ЛР для синхронного управления основными и дополнительными кинематическими осями, обеспечивающего разложение сложного движения на основные и дополнительные оси с целью повышения скорости процесса.

2. Разработана обобщённая структурная схема математического обеспечения специализированного контроллера модернизированной многокоординатной машины скоростной ЛР, осуществляющего управление процессом относительного движения кинематических координатных осей машины, составляющих базовую основу структуры её координатных столов.

Предложенный алгоритм является достаточно простым. Теория предложенного метода решения задачи достаточно чётко и подробно описана в [13, с. 5-52] и [14, с. 617-621].

#### Список литературы:

1. Белый, В.С. Исследование процессов прохождения видимого излучения через оптическую систему на базе тонкой собирающей линзы / В. С. Белый, С. С. Воробьев // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 3. – С. 582-591;
2. Белый, В. С. Теоретические аспекты обнаружения микроорганизмов методами активной или полуактивной оптической локализации с использованием критерия максимума правдоподобия / В. С. Белый, Д. Д. Бабаев // Оригинальные исследования. – 2022. – Т. 12. – № 8. – С. 64-76. – EDN PPIVIN;
3. Белый, В.С. Исследование явления внешнего фотоэффекта при взаимодействии видимого излучения с плоской металлической равномерно заряженной цинковой пластиной / В.С. Белый, Д.Д. Бабаев // E-Scio. – 2022. – № 3(66). – С. 443-451;
4. Белый, В. С. Теоретические аспекты обнаружения микроорганизмов методами активной или полуактивной оптической локализации с использованием критерия Неймана-Пирсона / В. С. Белый, Д. Д. Бабаев // Оригинальные исследования. – 2022. – Т. 12. – № 7. – С. 100-112. – EDN XVPHXC;
5. Белый, В. С. Особенности спектрального анализа пробы вещества с использованием низкотемпературной плазмы / В. С. Белый, Т. Н. Зайцева, А. В. Туранова // Обществознание и социальная психология. – 2022. – № 6(36). – С. 155-166. – EDN OFASJB;
6. Белый, В. С. Математическое моделирование распределения Больцмана в процессе получения низкотемпературной плазмы / В. С. Белый, Т. Н. Зайцева, А. В. Туранова

- // Обществознание и социальная психология. – 2022. – № 6(36). – С. 138-148. – EDN DKEKDC;
7. Белый, В. С. Исследование явления внешнего фотоэффекта при взаимодействии видимого излучения с плоской металлической равномерно заряженной цинковой пластиной / В. С. Белый, Д. Д. Бабаев // E-Scio. – 2022. – № 3(66). – С. 443-451. – EDN VGJYIP;
  8. Белый, В. С. Внешний фотоэффект при взаимодействии ультрафиолетового излучения с плоской металлической равномерно заряженной цинковой пластиной / В. С. Белый, С. С. Воробьев // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 3. – С. 575-581. – EDN KBLQGF;
  9. Бруннер В. Справочник по лазерной технике: Пер. с нем. С74 М.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 253-254;
  10. Кондратенко В.С., Борисовский В.Е., Гиндин П.Д., Наумов А.С. Новые технологии лазерной обработки деталей оптического приборостроения // Приборы. 2008. – № 3. – С. 46-49;
  11. Кондратенко В.С., Третьякова О.Н., Наумов А.С., Шевченко Г.Ю., Зобов А.К. Новые методы и средства управления промышленным оборудованием на базе технологии лазерного управляемого термораскалывания // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. – №6. – С. 43-46;
  12. Савельев И.В. Основы теоретической физики. Т.1. Механика и электродинамика. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – С. 153-234;
  13. Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики: Учебник для вузов / С. М. Тарг. – 11-е изд., исправленное – М.: Высшая школа, 1995. – С. 148-151;
  14. Яблонский, А. А. Курс теоретической механики: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по техническим специальностям / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – 7-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 1998. – С. 117-121.

**References:**

1. Bely, V.S. Investigation of the processes of visible radiation passing through an optical system based on a thin collecting lens / V. S. Bely, S. S. Vorobyov // Issues of sustainable development of society. – 2022. – No. 3. – pp. 582-591;
2. Bely, V. S. Theoretical aspects of detection of microorganisms by methods of active or semi-active optical location using the maximum likelihood criterion / V. S. Bely, D. D. Babaev // Original research. – 2022. – Vol. 12. – No. 8. – PP. 64-76. – EDN PPIVIN;
3. Bely, V.S. Investigation of the phenomenon of an external photoelectric effect in the interaction of visible radiation with a flat metal uniformly charged zinc plate / V.S. Bely, D.D. Babaev // E-Scio. – 2022. – № 3(66). – Pp. 443-451;
4. Bely, V. S. Theoretical aspects of detection of microorganisms by methods of active or semi-active optical location using the Neumann-Pearson criterion / V. S. Bely, D. D. Babaev // Original research. – 2022. – Vol. 12. – No. 7. – pp. 100-112. – EDN XVPHXC;

5. Bely, V. S. Features of spectral analysis of a substance sample using low-temperature plasma / V. S. Bely, T. N. Zaitseva, A.V. Turanova // Social studies and social psychology. – 2022. – № 6(36). – Pp. 155-166. – EDN OFASJB;
6. Bely, V. S. Mathematical modeling of Boltzmann distribution in the process of obtaining low-temperature plasma / V. S. Bely, T. N. Zaitseva, A.V. Turanova // Social studies and social psychology. – 2022. – № 6(36). – Pp. 138-148. – EDN DKEKDC;
7. Bely, V. S. Investigation of the phenomenon of an external photoelectric effect in the interaction of visible radiation with a flat metal uniformly charged zinc plate / V. S. Bely, D. D. Babaev // E-Scio. – 2022. – № 3(66). – Pp. 443-451. – EDN BGJYIP;
8. Bely, V. S. External photoelectric effect in the interaction of ultraviolet radiation with a flat metal uniformly charged zinc plate / V. S. Bely, S. S. Vorobyev // Issues of sustainable development of society. – 2022. – No. 3. – PP. 575-581. – EDN KBLQGF;
9. Brunner V. Handbook of laser technology: Trans. from it. С74 М.: Energoatomizdat, 1991. – pp. 253-254;
10. Kondratenko V.S., Borisovsky V.E., Gindin P.D., Naumov A.S. New technologies of laser processing of optical instrument-making parts // Instruments. 2008. – No. 3. – pp. 46-49;
11. Kondratenko V.S., Tretyakova O.N., Naumov A.S., Shevchenko G.Yu., Zobov A.K. New methods and controls of industrial equipment based on laser controlled thermal cracking technology // Mechatronics, automation, control. 2014. – No. 6. – pp. 43-46;
12. Savelyev I.V. Fundamentals of theoretical physics. Vol. 1. Mechanics and electrodynamics. – M.: Nauka. Gl. ed. phys.-mat. lit., 1991. – pp. 153-234;
13. Targ, S. M. A short course in theoretical mechanics: A textbook for higher education institutions / S. M. Targ. – 11th ed., revised - M.: Higher School, 1995. – pp. 148-151;
14. Yablonsky, A. A. Course of theoretical mechanics: Textbook for university students studying in technical specialties / A. A. Yablonsky, V. M. Nikiforova. - 7th ed., erased. - St. Petersburg: Lan, 1998. – pp. 117-121.