



## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ 3D-МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЯ СО СПИРАЛЬНО-СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПЕРЕМЕННОГО ШАГА

В статье рассматривается конструкторское обеспечение проектирования и производства деталей автоматизированных поточных линий с поштучной подачей объектов производства, выполняемое на базе специализированного прикладного программного обеспечения. Результатом исследования является оригинальная методика построения цифровой 3D-модели специального изделия со спирально-сферической поверхностью переменного шага с учетом предъявляемых технологических и эксплуатационных требований к его конструкции.

3D-модель, цифровой макет, спирально-сферическая поверхность переменного шага, конструкторская и технологическая подготовка производства, инженерный анализ.

Одним из ключевых факторов развития современного машиностроительного производства является проблема качественных характеристик выпускаемых изделий, сокращение временных затрат и величины технической подготовки и максимальное удовлетворение запросов конечного потребителя. Использование систем автоматизированного проектирования (САПР) позволяет решить данные вопросы и, кроме того, существенно снижает себестоимость проектных работ.

Основными отличиями и новизной данного проекта НИОКР является применение принципов цифровых технологий в решении задачи разработки оригинальной методики построения цифровой 3D-модели специального изделия со спирально-сферической поверхностью переменного шага.

Эффективное и надежное проектирование на базе современных программных средств можно осуществить только на основе системного подхода, объединяющего на новом системном уровне известные методы анализа. Рекомендуемая последовательность: анализ физической сущности задачи, представление физической модели; анализ по аналогам; анализ приближенным ручным экспресс-расчетом; анализ приближенных и локальных моделей средствами САПР; уточненный анализ численных моделей для конечного проектирования [2].

В моделировании следует использовать ряд моделей: концептуальную, рабочую, фрагмент, интегральную и т.п. Каждая модель должна сопровождаться предварительным анализом.

Для автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства разработано огромное количество программных средств, используемых на всех этапах подготовки. Наиболее востребованными и значимыми являются системы CAD/CAE-класса.

CAD-системы (Computer Aided Design) – компьютерная поддержка проектирования конструкций и технических объектов [2]. Именно эти системы были первыми разработаны и внедрены в процесс конструкторской подготовки производства. Основная зада-

ча на первом этапе внедрения САД-систем заключалась в замене ручного черчения двухмерных чертежей на кульмане более эффективным инструментом машинной графики. По мере наращивания мощности вычислительных средств, используемых для решения инженерных задач, в системах автоматизированного проектирования появилась возможность создавать не двухмерную проекцию, а трехмерную модель, представленную в виде визуализированного образа математической модели формы проектируемого объекта.

САЕ-системы (Computer Aided Engineering) – компьютерная поддержка инженерного анализа), как правило, реализуют универсальные подходы метода конечных элементов, с помощью которого можно проводить моделирование и численные расчеты практически любых физических полей [3, 4]. К САЕ можно отнести обширный класс подсистем, каждая из которых позволяет автоматизировать определенную инженерную задачу (класс однородных задач): от расчетов на прочность, анализа аэро-, гидро-, термодинамических процессов до моделирования функционирования машин и механизмов.

Функции САД-систем в машиностроении подразделяют на функции двухмерного (2D) и трехмерного (3D) проектирования. К функциям 2D относят черчение, оформление конструкторской документации; к функциям 3D – получение трехмерных геометрических моделей, метрические расчеты, реалистичную визуализацию, взаимное преобразование 2D- и 3D-моделей. Трехмерные модели представляют в виде описания поверхностей, ограничивающих деталь, или указанием элементов пространства, занимаемых телом детали. Модели поверхностей сложной формы получают с помощью разновидностей кинематического метода, к которым относят вытягивание заданного плоского контура по нормали к его плоскости, протягивание контура вдоль произвольной пространственной кривой, вращение контура вокруг заданной оси, натягивание поверхности между несколькими заданными сечениями.

К важным характеристикам САД-систем относятся параметризация и ассоциативность. Параметризация подразумевает использование геометрических моделей в параметрической форме, т.е. при представлении части или всех параметров объекта не константами, а переменными. Параметрическая модель, находящаяся в базе данных, легко адаптируется к разным конкретным реализациям и потому может использоваться во многих конкретных проектах. При этом появляется возможность включения параметрической модели детали в модель сборочного узла с автоматическим определением размеров детали, диктуемых пространственными ограничениями. Эти ограничения в виде математических зависимостей между частью параметров сборки отражают ассоциативность моделей.

Параметризация и ассоциативность играют важную роль при проектировании конструкций узлов и блоков, состоящих из большого числа деталей. Действительно, изменение размеров одних деталей оказывает влияние на размеры и расположение других. Благодаря параметризации и ассоциативности изменения, сделанные конструктором в одной части сборки, автоматически переносятся в другие части, вызывая изменения соответствующих геометрических параметров в этих частях.

Корректные синтез и редактирование твердотельных 3D-моделей изделий возможны с помощью нескольких методов.

Наиболее очевидный метод – задание проектировщиком изделия ограничений и условий, накладываемых на параметры модели и отражающих требования непересечения тел, соосности отверстий, компланарности, перпендикулярности и т.п.

В большинстве современных МСАД используется метод, основанный на использовании дерева построения модели. Деревом построения называют последовательность операций создания модели, упорядоченную по времени их совершения. Согласно этому методу внесение изменений в ту или иную часть модели подразумевает переход в ту вершину дерева, которая соответствует изменяемой части, и после внесения изменений повторное выполнение всех последующих операций синтеза.

Третий способ – синхронное моделирование, основанное на автоматическом определении, благодаря применению экспертных систем, тех ограничений, которые в первом методе задаются пользователем. В результате упрощается работа конструктора, не требуются затраты времени на перестроение дерева модели.

На рисунке 1 приведено изображение образца изделия, вышедшего из строя в результате износа.

На рисунке 2 изображена захватная зона шнека, на которой имеются многочисленные следы истирания и выкрашивания поверхностей. Это свидетельствует о некорректной работе изделия, очевидно, по причине несоответствия условиям эксплуатации параметров формы спиральной поверхности.



*Рис. 1. Внешний вид детали*



*Рис. 2. Следы эксплуатационного износа в захватной зоне*

Вероятно, данный образец не является штатной деталью технологического оборудования, для использования в котором предназначен.

Целью настоящей работы является корректировка формы спирально-сферической поверхности переменного шага изделия, обеспечивающая улучшение условий работы и, в итоге, создание цифровой 3D-модели данного изделия.

Наличие такой модели позволит с минимальными затратами осуществить производство таких деталей на технологическом оборудовании, оснащённом системой числового программного управления.

Винтовая линия (рис. 3) – линия, описываемая точкой  $M$ , которая вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega$  вокруг неподвижной оси ( $Oz$ ) и одновременно перемещается поступательно с постоянной скоростью  $v$  вдоль этой оси.

Параметрические уравнения:

$$x = a \cos \omega t, \quad y = a \sin \omega t, \quad z = vt$$

или

$$x = a \cos \varphi, \quad y = a \sin \varphi, \quad z = b \varphi,$$

где  $a$  – радиус цилиндра, на котором расположена линия;

$$\varphi = \omega t, \quad b = v/\omega = h/2\pi;$$

где  $h$  – шаг винтовой линии.

Проекция винтовой линии на координатные плоскости:

на плоскость  $xOy$ , окружность:

$$x^2 + y^2 = a^2,$$

на плоскость  $yOz$ , синусоида:

$$y = a \sin(z/b);$$

на плоскость  $xOz$ , синусоида:

$$x = a \cos(z/b).$$

Длина винтовой линии от точки пересечения с плоскостью  $xOy$  до синусоида произвольной точки:

$$M: s = \sqrt{a^2 + b^2} t.$$

На рисунке 4 показано образование винтовой линии на поверхности цилиндра от движения точки  $A$  по образующей  $EC$  и вращательного движения этой образующей. Здесь изображено несколько положений этой образующей:  $E_0C_0, E_1, C_1, \dots$ ; при этом дуги  $E_0E_1, E_1E_2, \dots$  равны между собой и каждая равна  $\pi d/n$ , где  $d$  – диаметр цилиндра, а  $n$  – число делений. Начальное положение точки обозначено через  $A_0$ , последующее – соответственно через  $A_1, A_2$  и т.д.

Если при перемещении образующей из положения  $E_0C_0$  в положение  $E_1C_1$  точка займет положение  $A_1$ , то отрезок  $E_1A_1$  определит расстояние, которое точка прошла по образующей от своего первоначального положения. При последующем положении образующей ( $E_2C_2$ ) точка поднимется на высоту  $E_2A_2 = 2E_1A_1$  и т.д. Когда образующая сделает полный оборот, точка переместится по ней на расстояние  $E_0A_{12} = 12E_1A_1$ .

При дальнейшем вращении образующей точка  $A$  начнет образовывать второй виток, или оборот винтовой линии, занимая положения  $A_{11}, A_{12}$  и т.д.

Расстояние между точками  $A_0$  и  $A_{12}$  называется шагом винтовой линии. Шаг может быть выбран в зависимости от тех или иных условий.

Расстояние точки  $A$  до оси  $00$  называется радиусом винтовой линии, а ось  $00$  – осью винтовой линии. Радиус винтовой линии равен половине диаметра прямого кругового цилиндра, на боковой поверхности которого располагается винтовая линия. Две величины – диаметр цилиндра и размер шага – являются параметрами, определяющими цилиндрическую винтовую линию на боковой поверхности прямого кругового цилиндра.

Можно построить на поверхности цилиндра кривую линию, образованную так же, как и винтовая линия, но вращение образующей цилиндра оставить равномерным, а перемещение точки по образующей сделать переменным по какому-либо закону. Такие кривые иногда называют винтовыми линиями с переменным шагом.

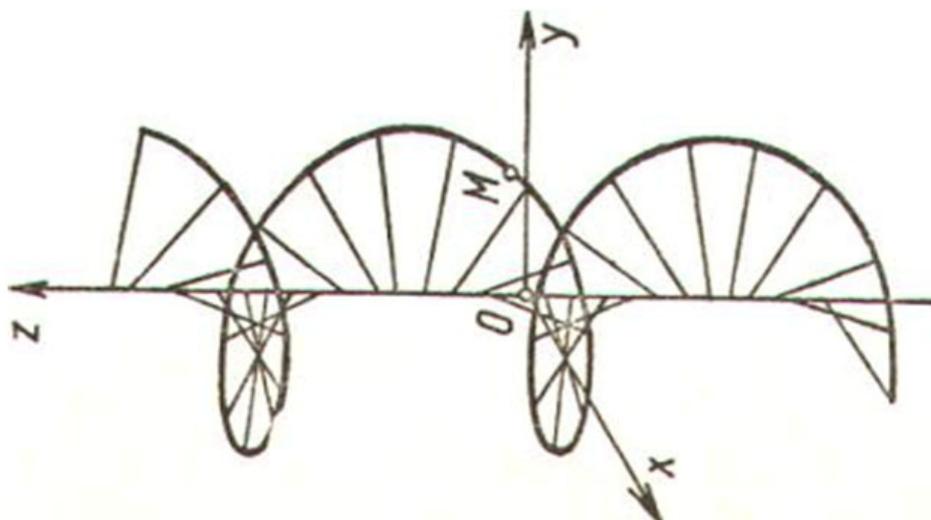


Рис. 3. Винтовая линия

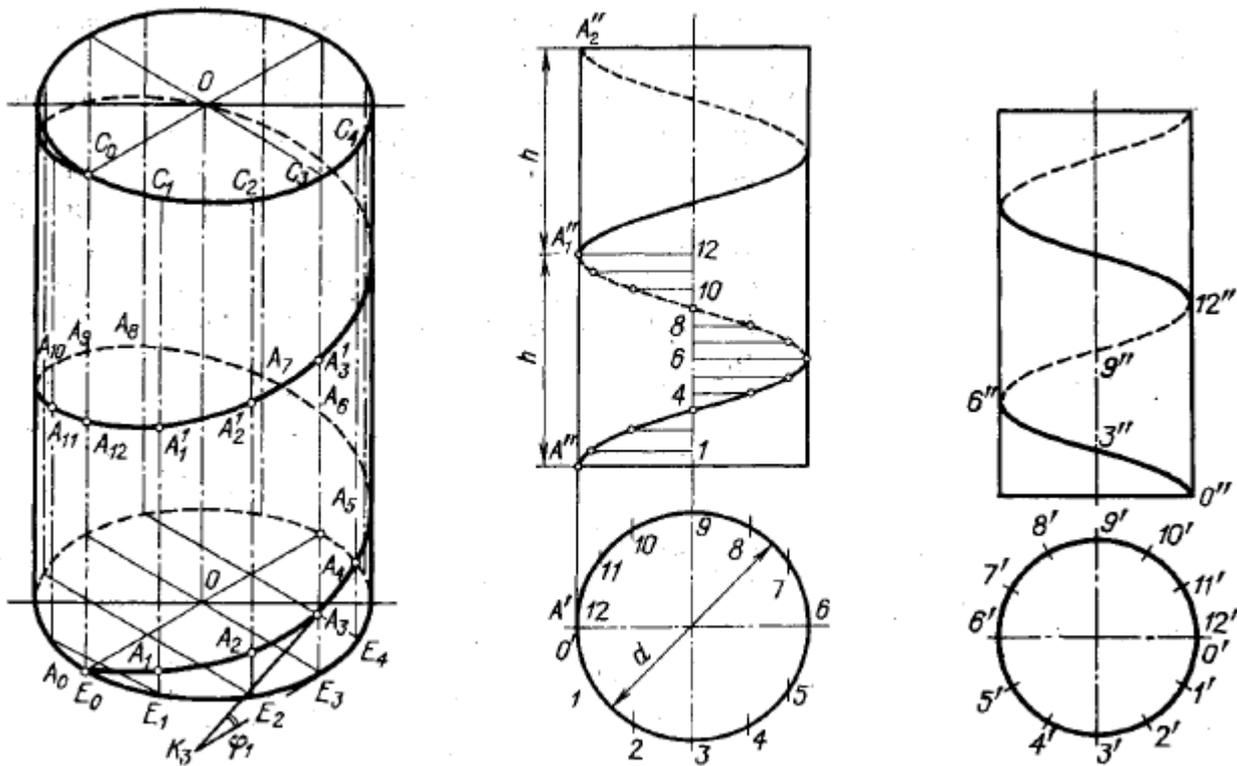


Рис. 4. Построение винтовой линии

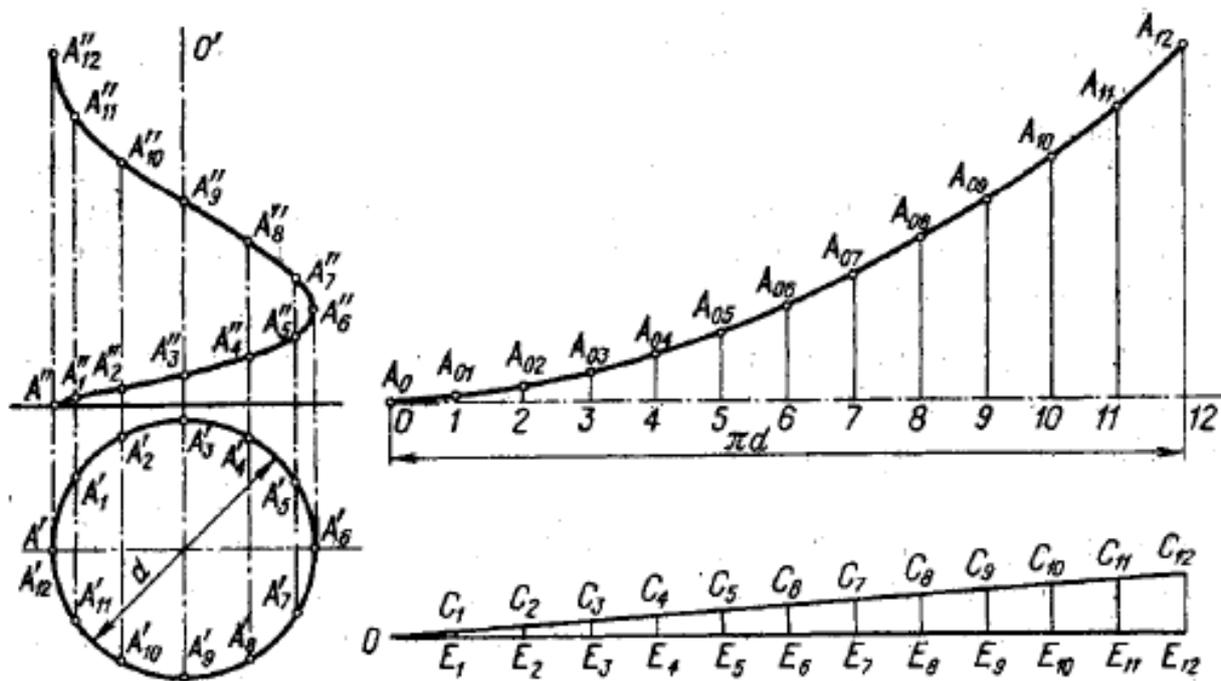


Рис. 5. Построение винтовой линии с переменным шагом

Построение дано на рисунке 5 при равномерно ускоренном движении точки по образующей. Заданы перемещения точки в каждом из отмеченных двенадцати положений образующей; например, при девятом положении точка переместится на отрезок  $C_9E_9$  (считая от восьмого положения этой точки).

Системы автоматизированного проектирования позволяют автоматизировать построение таких линий.

Для винтовых линий с постоянным шагом можно использовать стандартные команды создания винтовых линий, а для винтовых линий с переменным шагом можно воспользоваться построением линий по уравнению. Пример построения такой линии в САПР представлен на рисунке 6.

Параметры линии можно задавать как в табличном виде, так и в виде уравнения движения точки. Пример представлен на рисунке 7.

В результате анализа результатов, полученных в процессе исследования конструктивных элементов изделия по образцу, разработаны принципиальные

решения для реинжиниринга, для улучшения эксплуатационных характеристик разработан вал со спирально-сферической поверхностью переменного шага, но с постоянным размером винтовой канавки. Цифровая 3D-модель спроектированного вала представлена на рисунке 8. На рисунке 9 представлен чертеж вала.

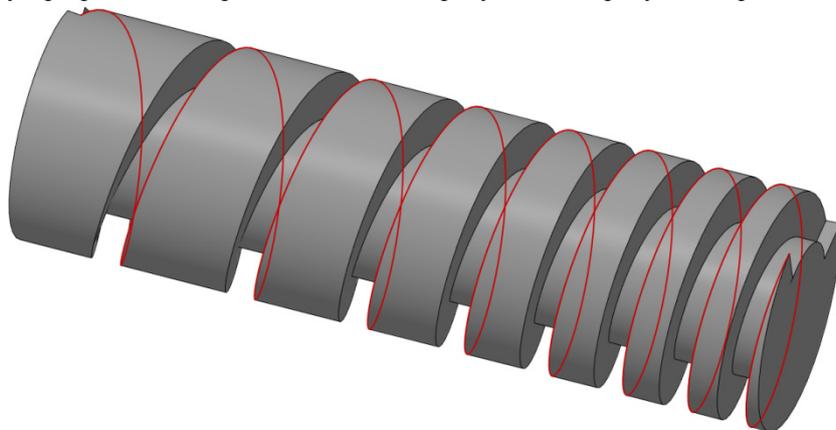


Рис. 6. 3D-модель винтовой линии с переменным шагом в САПР

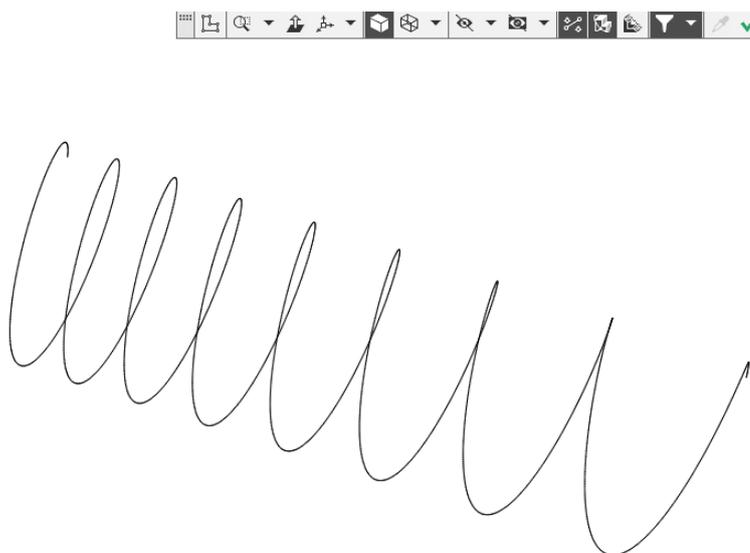
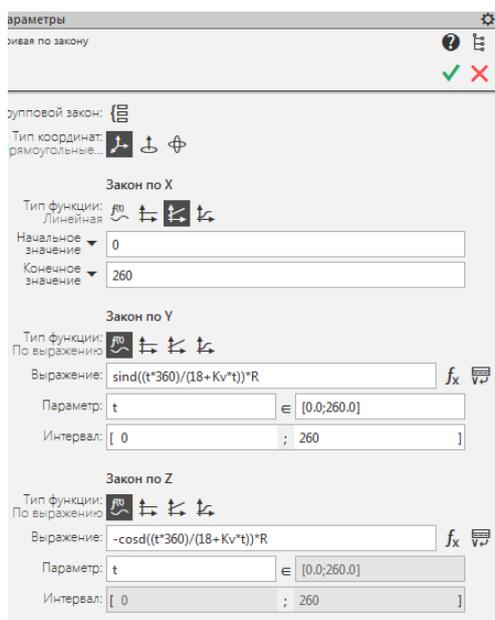


Рис. 7. Параметры 3D-модели винтовой линии с переменным шагом

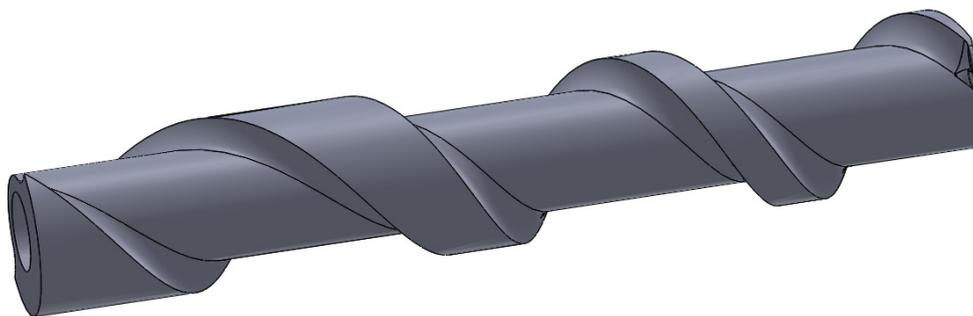


Рис. 8. 3D-модель вала шнека с переменным шагом

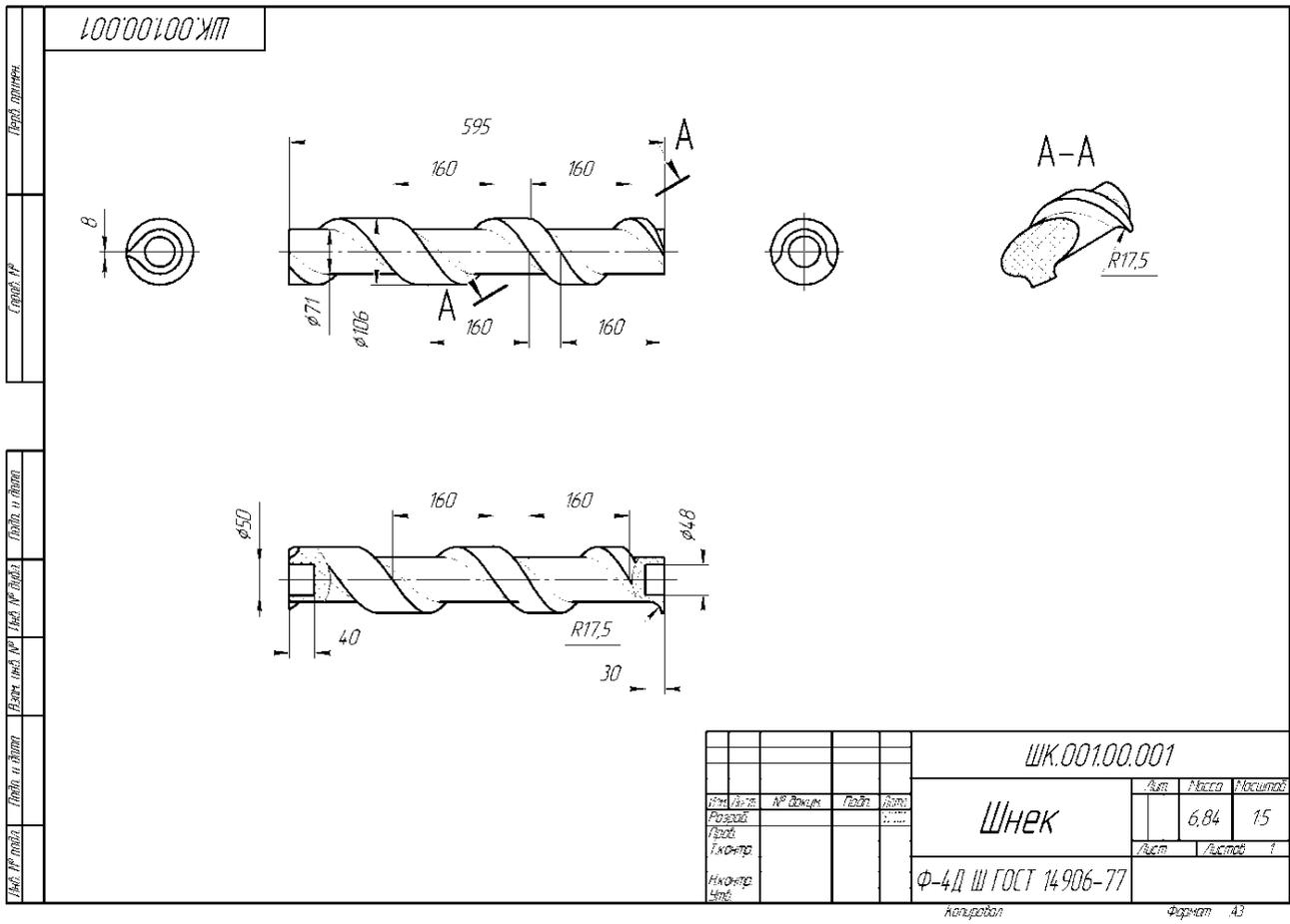


Рис. 9. Чертеж изделия



Рис. 10. Перемещение тары валом с винтовой линией с переменным шагом

Главными достоинствами новой модели являются снижение риска заклинивания при транспортировке тары, а также снижение трения и повышение срока эксплуатации.

В качестве примера использования изделий с геометрией, задаваемой похожими поверхностями, можно привести конвейерный вал для поштучной выдачи стеклянной тары на производстве. На рисунке 10 представлен подобный вал.

Предложенные конструктивные решения разработаны с учетом требований технологичности производства и сборки (монтажа), обеспечивают соблюдение условий прочности, жесткости и работоспособности конструкции изделия в соответствии с его назначением.

В ходе работы были достигнуты следующие научно-практические результаты.

1. Проведен аналитический обзор методик построения сложных 3D-поверхностей. Модели поверхностей сложной формы могут быть получены с помощью разновидностей кинематического метода, к которым относят вытягивание заданного плоского контура по нормали к его плоскости, протягивание контура вдоль произвольной пространственной кривой, вращение контура вокруг заданной оси, натягивание поверхности между несколькими заданными сечениями.

2. Выполнен анализ конструктивных элементов изделия по образцу. Выявлены и уточнены отдельные элементарные виды поверхностей и их взаимные связи (переходные поверхности). Рассмотрены кинематические особенности эксплуатационных условий шнека и выявлены прогнозируемые механические воздействия в условиях его работы в составе транспортного устройства.

3. Разработана методика построения цифровой 3D-модели изделия.

4. Выполнена разработка 3D-модели шнека с учетом предъявляемых технологических и эксплуатационных требований к его конструкции. Проведена оценка удовлетворения параметров модели критериям соблюдения кинематических особенностей эксплуатационных условий и устойчивости к прогнозируемым механическим воздействиям в процессе его работы. Предусмотрены предложения по уточнению 3D-модели изделия с учетом результатов пробной эксплуатации.

#### Литература

1. Андреев, Л. Н. Системы автоматизированного проектирования / Л. Н. Андреев, Д. Е. Бортяков, С. В. Мещеряков. – Санкт-Петербург : СПбГТУ, 2002. – 78 с.

2. Черепашков, А. А. Компьютерные технологии. Создание, внедрение и интеграция промышленных автоматизированных систем в машиностроении : учебное пособие / А. А. Черепашков. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2008. – 143 с.

3. Булавин, В. Ф. Валидация CAD-продуктов в малых предприятиях машиностроительного сектора / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина, В. В. Яхричев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2017. – № 5 (325). – С. 64–72.

4. Булавин, В. Ф. Цифровые технологии в малом бизнесе машиностроительной отрасли / В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев // *САПР и графика*. – 2018. – № 6. – С. 52–55.

5. Замрий, А. А. Практический учебный курс. CAD/CAE система APM WinMachine / А. А. Замрий. – Москва : ДМК–Пресс. – 2007. – 144 с.

*A.S. Stepanov, V.V. Yakhrichev*  
Vologda State University

#### DEVELOPMENT OF METHOD FOR CONSTRUCTING DIGITAL 3D MODEL OF A PRODUCT WITH SPIRAL - SPHERICAL SURFACE OF VARIABLE PITCH

The article examines the design support for the design and production of parts of automated production lines with piece-by-piece supply of production facilities, performed on the basis of specialized applied software. An original technique has been developed for constructing a digital 3D model of a special product with a spiral-spherical surface of variable pitch, taking into account the technological and operational requirements for its design.

3D model, digital mock-up, spiral-spherical surface of variable pitch, design and technological preparation of production, engineering analysis.