

## АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ОПИСАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ОТСЕКОВ ПОВЕРХНОСТИ

**Введение.** Всестороннее применение компьютерных средств в производственных процессах приводит к интенсивному накоплению цифровой информации, отражающей сведения по их реализации. Многократное использование накопленной информации, например типовых проектов, ранее реализованных прототипов (аналогов) продукции и т.п., в решении новых задач является залогом повышения эффективности производства. Однако в случае существования больших объемов данных, а также хранения данных в неупорядоченном виде время поиска требуемой информации может быть соизмеримо с затратами времени на разработку нового проекта с нуля. Это обуславливает актуальность технологий «Data Mining», ориентированных на решение задач поиска в больших объемах данных неочевидных, объективных и полезных закономерностей и информации [1]. Среди прочих направлений, связанных с совершенствованием процессов извлечения, представления и использования полезной информации, можно выделить разработку автоматизированных технологий организации баз данных и поиска полезной информации, направленных на повышение эффективности проектирования новой продукции за счет внедрения процедур избирательного преобразования 3D-моделей ранее изготовленных технических объектов [2, 3]. Не менее важным является создание автоматизированных интерпретаторов и классификаторов информационных моделей для интеграции CAD и CAPE систем при обеспечении сквозной автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства [4–6]. В основе реализации этих технологий лежит анализ геометрии поверхностей технических объектов, описание которой характеризуется значительной степенью неоднозначности и субъективности. Преодолеть сложности анализа глобальной геометрической формы поверхности позволяет дискретное ее представление совокупностью участков (отсеков).

**Особенности декомпозиции поверхности деталей на конструкторско-технологические элементы.** В процессе декомпозиции на составляющие элементы деталь рассматривается как модель, включающая две основные компоненты [5, 7]:

$$M = \langle N, O \rangle, \quad (1)$$

где  $N$  – множество конструкторско-технологических элементов (КТЭ),  $O$  – множество отношений между ними.

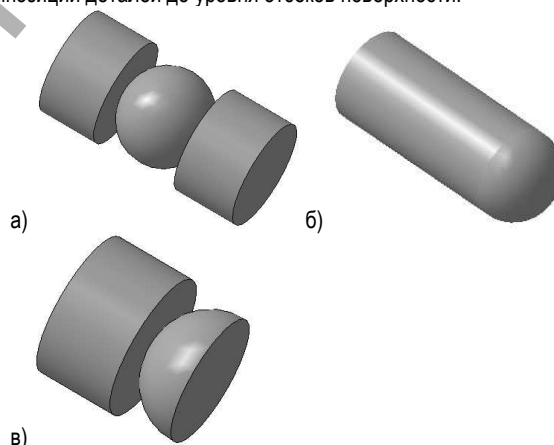
Для описания КТЭ используются параметры формы, размерные параметры (шероховатость поверхности, отклонения от правильной геометрической формы), физико-механические свойства. Набор параметров математического описания формы КТЭ детали включает длину КТЭ, измеряемую относительно оси вращения детали ( $L$ ), диаметр КТЭ ( $D$ ), отношение осевой длины КТЭ к общей осевой длине детали ( $Otn$ ), угол между образующей и осью вращения поверхности ( $\alpha$ ), параметр присутствия материала ( $Ma$ ), геометрическую форму образующей ( $F$ ), местоположение элемента в детали ( $Mp$ ) [5]:

$$N = \langle L, D, Otn, \alpha, Ma, F, Mp \rangle. \quad (2)$$

Алгоритмы, разработанные на основе модели (2), позволили достаточно успешно формализовать КТЭ при автоматизации процедур распознавания и идентификации структурных элементов поверхности деталей общемашиностроительного применения типа «тела вращения» (класс 71) по ЕСКД [5, 6]. При этом математическое представление КТЭ посредством указанного набора парамет-

ров формируется, главным образом, в результате оценки относительных размеров и положения КТЭ в детали (таблица 1).

В указанной модели критериями анализа собственно геометрической формы поверхности КТЭ являются вид образующей и ее положение относительно оси вращения детали. Однако этих двух критериев недостаточно для полного и однозначного описания геометрической конфигурации поверхности КТЭ. Например, на рисунке 1 представлены КТЭ, соответствующие лингвистическому описанию и математическому представлению первой колонки таблицы 1, т.е. поверхностям, получаемым вращением концентрической образующей вокруг оси вращения детали (ступеням, имеющим сферическую поверхность). Очевидно, что комбинация и форма участков поверхностей представленных КТЭ существенно отличается от типовой. Также отличается их функциональное назначение и технология формообразования, реализующая обработку резанием. В детали, показанной на рисунке 1 б, КТЭ является не ступенью, а скруглением. При рассмотрении детали рисунка 1 в правильнее будет отнести КТЭ к уступам. Кроме того, задание одних и тех же поверхностей может осуществляться различными методами. Так, для цилиндрической поверхности параметром формы образующей может быть не только прямая, но и окружность. Таким образом, отличия геометрической конфигурации КТЭ и способов задания поверхностей порождают неоднозначность интерпретации КТЭ, что, в свою очередь, затрудняет практическое использование и ограничивает сферу применения автоматизированных классификаторов. Поэтому для сокращения неопределенности описания геометрической конфигурации КТЭ и деталей, в целом, предлагается увеличить глубину декомпозиции деталей до уровня отсеков поверхности.



**Рис. 1.** Примеры конструкторско-технологических элементов, полученных вращением концентрической образующей вокруг оси вращения детали

**Основные положения описания геометрической формы деталей с помощью отсеков поверхности.** В общем случае под отсеком поверхности геометрического объекта понимается сопряженный с другими из условия непрерывности или по требуемому порядку гладкости участок одной (сплошной) обрабатываемой поверхности детали, ограниченный криволинейным многоугольником, внутри

**Полозков Юрий Владимирович**, к.т.н., заведующий кафедрой «Инженерная графика» Витебского государственного технологического университета.

**Евтушенко Александр Владимирович**, магистрант кафедры «Инженерная графика» Витебского государственного технологического университета.

Беларусь, ВГТУ, 210035, г. Витебск, пр. Московский, 72.

Таблица 1. Типовые КТЭ, формализованные в результате декомпозиции деталей [5]

<b>Визуальное представление</b>			
<b>Лингвистическое описание</b>	Поверхности, получаемые вращением концентрической образующей вокруг оси вращения детали	Поверхности, получаемые вращением параллельной образующей вокруг оси вращения детали	Поверхности, получаемые вращением сложной образующей вокруг оси вращения детали
<b>Математическое представление</b>	$N = \langle L, D, Otn, \alpha, Ma, F \rangle$ L = "В широких пределах" D = "В широких пределах" Otn = "В широких пределах" $\alpha$ = "Не определен" Ma = "Отсутствует" F = "Окружность"	$N = \langle L, D, Otn, \alpha, Ma, F \rangle$ L = "В широких пределах" D = "В широких пределах" Otn = "В широких пределах" $\alpha$ = "0°" Ma = "Отсутствует" F = "Прямая"	$N = \langle L, D, Otn, \alpha, Ma, F \rangle$ L = "В широких пределах" D = "В широких пределах" Otn = "В широких пределах" $\alpha$ = "Не определен" Ma = "Отсутствует" F = "Не определена"
<b>Система продукции</b>	<b>ЕСЛИ</b> F = "Прямая" <b>И</b> $\alpha = 0^\circ$ , <b>ТО</b> $Q_6$ = "Поверхности вращения с образующей параллельной оси вращения" <b>ЕСЛИ</b> F = "Прямая" <b>И</b> $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ , <b>ТО</b> $Q_6$ = "Поверхности вращения с образующей под углом к оси вращения" <b>ЕСЛИ</b> $\alpha$ = "Не определен" <b>И</b> F = "Окружность", <b>ТО</b> $Q_6$ = "Поверхности вращения с концентрической образующей" <b>ЕСЛИ</b> $\alpha$ = "Не определен" <b>И</b> F = "Не определена", <b>ТО</b> $Q_6$ = "Поверхности вращения с фасонной образующей"		

которого поверхность описывается одним уравнением (рисунок 2) [8]. В нашем случае достаточно определить отсек, как участок поверхности одного вида (плоской, цилиндрической, конической, сферической, торовой, и др.), которая отделена от поверхности другого вида граничной линией или плавно переходит в поверхность другого вида (сопрягается с поверхностью другого вида). Один или несколько отсеков составляют фрагмент поверхности, под которым может пониматься КТЭ детали. Тогда геометрическая конфигурация КТЭ детали на уровне отсеков может быть представлена в виде:

$$\langle S, O_S, Q_P \rangle, \quad (3)$$

где  $S$  – множество отсеков поверхности,  $O_S$  – множество взаимных отношений между отсеками,  $Q_P$  – множество свойств КТЭ.

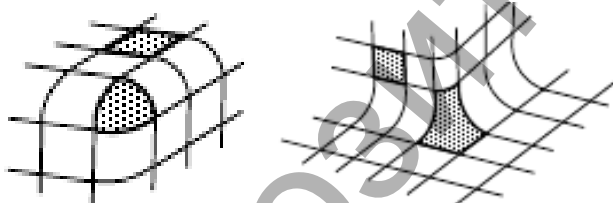


Рис. 2. Примеры отсеков обрабатываемой поверхности детали [8]

Отсек поверхности описывается следующим набором:

$$S_j = \{A, T, V, G\}, \quad (4)$$

где  $A$  – вид отсеков,  $T$  – тип (наружный или внутренний),  $V$  – размеры отсека,  $G$  – параметры топологии поверхности отсека. Параметры топологии поверхностей являются обязательными при рассмотрении отсеков, имеющих пространственно сложную форму.

На основе анализа параметров отсеков устанавливаются их взаимные отношения для структурного описания КТЭ:

$$O_S = \{P, O_S, R_S, W, I\}, \quad (5)$$

где  $P$  – взаимное расположение,  $O_S$  – порядок сопряжения,  $R_S$  – относительные размеры,  $W$  – значимость (вес),  $I$  – инвариантность отсеков.

На основании  $S$  и  $O_S$  в соответствии с определенными правилами формируется набор показателей КТЭ, характеризующих его как целое ( $p: (S, O_S) \rightarrow Q_P$ ):

$$Q_P = \{m, V_e, St, P, D_e, T\}, \quad (6)$$

где  $m$  – количество отсеков КТЭ,  $V_e$  – размеры КТЭ,  $St$  – обобщенная структура КТЭ,  $P$  – положение КТЭ в детали,  $D_e$  – назначение КТЭ,  $T$  – название КТЭ.

Параметры определителя (3) используются для построения шаблонов структурного описания КТЭ, описывающих их типовую форму. Эти шаблоны предназначены для уточнения формы КТЭ на этапе предобработки данных в автоматизированном классификаторе деталей. Исходной информацией для сравнения геометрической структуры поверхности анализируемой цифровой модели с шаблонами КТЭ служат универсальные форматы обмена данных IGES, STEP. Компьютерные модели деталей в этих графических форматах представляют собой текстовую запись, описывающую упорядоченный набор отсеков поверхности, организованную в виде структуры B-Rep (Boundary Representation) [9, 10]. Структурой B-Rep описывается иерархия декомпозиции поверхностей сложных геометрических объектов на составляющие их простые конструкты. Однако при ее разработке не преследовалась цель выделения и интерпретации КТЭ, составляющих поверхность технических объектов, ввиду их значительного количества и разнообразия форм. Алгоритм чтения данных B-Rep заключается в анализе меток, указывающих на явно и неявно заданные геометрические конструкты (сущности). В результате этого анализа устанавливается тип и параметры элементарных конструктов поверхности, которые записываются в базу данных, создаваемую, например, в соответствии с методикой, описанной в [10].

**Основы алгоритмизации построения шаблонов КТЭ в терминах отсеков поверхности.** Для программной реализации описания КТЭ с помощью отсеков поверхности составляются таблицы основных терминов с их цифровым кодированием (таблицы 2–4). Кодировочные таблицы по мере необходимости могут быть расширены.

Таблица 2. Кодировочная таблица видов отсеков

Наименование	Код
Плоский	1
Цилиндрический	2
Конический	3
Сферический	4
Торовый	5
Сложной формы	6

Таблица 3. Кодировочная таблица типов отсеков

Наименование	Код
<b>Наружная</b>	
Открытая	1
Закрытая	2
<b>Внутренняя</b>	
Открытая	-1
Закрытая	-2

Таблица 4. Кодировочная таблица взаимного расположения

Наименование	Код
Параллельность	1
Перпендикулярность	2
Соосность	3
На расстоянии	4
Под углом	5
Касание	6
Совпадение	7

С использованием кодировочных таблиц осуществляется построение шаблонов структурного описания поверхности КТЭ, общий алгоритм которого включает следующие основные шаги:

Шаг 1. Составление исходных матриц. На основе кодировочных таблиц заполняются матрица-столбец видов отсеков, составляющих поверхность всей детали, матрица взаимного расположения отсеков, матрица смежности отсеков. Например, для канавки, изображенной на рисунке 3, матрица-столбец видов отсеков будет иметь вид:  $M_B = (1, 5, 5, 1, 2)^T$ . Размер этой матрицы соответствует количеству отсеков поверхности ( $m$ ). При заполнении исходных матриц нумерация отсеков может быть произвольной. Для

определения взаимного расположения отсеков формируется верхнетреугольная матрица, с нулевой главной диагональю (таблица 5). Размерность этой матрицы равна  $m \times m$ , а номера строк и столбцов соответствуют номерам отсеков поверхности детали. В ячейке на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца указывается номер взаимного расположения рассматриваемого отсека с каждым другим отсеком, номер которого соответствует номеру столбца. Нумерация строк изменяется в пределах:  $i = 1, m-1, j = i+1, m$ .

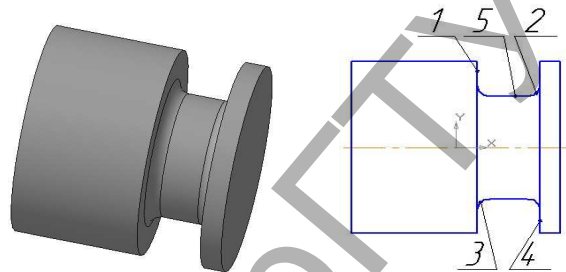
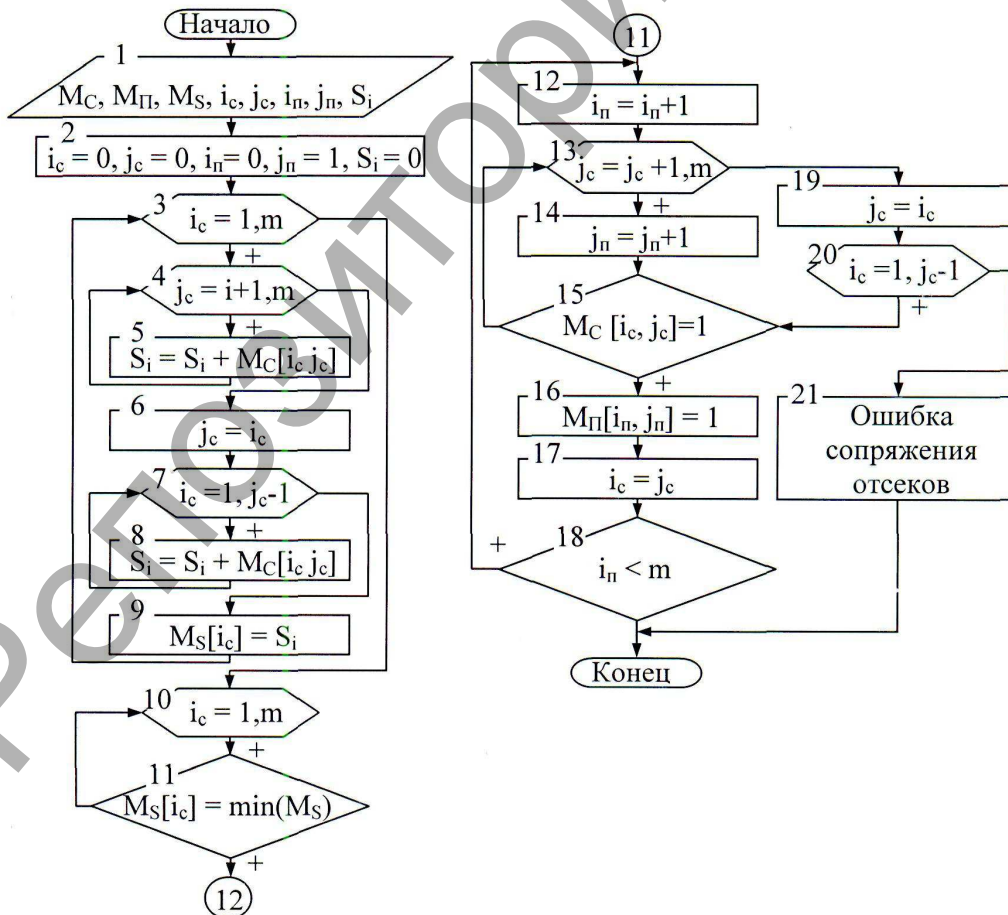


Рис. 3. Поверхность прямоугольной канавки цилиндрической детали

Таблица 5. Матрица взаимного расположения отсеков

$M_P$	1.	2.	3.	4.	5.
1.	0	4	6	1	2
2.		0	4	6	6
3.			0	4	6
4.				0	2
5.					0



$M_C$  – матрица сопряжений;  $M_P$  – матрица порядка сопряжений;  $M_S$  – матрица сумм.

Рис. 4. Алгоритм записи данных в матрицу порядка сопряжения отсеков

Аналогично формируется матрица смежности отсеков. В ячейках матрицы смежности на пересечении соответствующих строк и столбцов записывается единица, если данные отсеки являются смежными, в противном случае выставляется ноль.

**Шаг 2. Формирование производных матриц.** В результате применения логических условий с данными исходных матриц формируются производные матрицы. Матрица-столбец типов отсеков и верхнетреугольная матрица с нулевой диагональю порядка сопряжения отсеков составляются на основе анализа матрицы смежности отсеков.

Определение типов отсеков заключается в суммировании значений ячеек столбца и строки для каждого из отсеков в матрице смежности и поиске минимальной суммы. Отсеки, имеющие минимальную сумму, считаются открытыми, т.к. являются смежными с наименьшим количеством других отсеков. Все остальные считаются закрытыми. Определение типов отсеков для наружной и внутренней поверхности выполняется раздельно. Тип наружной или внутренней поверхности отсека определяется метками формата STEP. В примере, представленном на рисунке 3, поверхности отсеков являются наружными. Поэтому знак кода будет положительным, а матрица типов отсеков будет иметь вид  $M_T = (1, 2, 2, 1, 2)^T$ .

Для того чтобы упорядочить нумерацию отсеков в соответствии с их смежностью, выбирается один из открытых отсеков в качестве базового. Далее по алгоритму, представленному на рисунке 4, выполняется сортировка номеров отсеков, в результате которой формируется матрица порядка сопряжения отсеков. В этой матрице единичные значения будут содержать ячейки с координатами  $[i, i+1]$ . Представленный алгоритм применим для сортировки отсеков КТЭ нижнего уровня, не имеющих дочерних КТЭ. После этого перестраиваются все ранее построенные матрицы в соответствии с новой нумерацией. Например, матрица взаимного расположения отсеков примет вид таблицы 6.

Таблица 6. Матрица взаимного расположения упорядоченных отсеков

<i>M<sub>p</sub></i>	1.	2.	3.	4.	5.
1.	0	6	2	4	1
2.		0	6	4	4
3.			0	6	2
4.				0	6
5.					0

Совокупность данных, представленных в матричном виде в результате выполнения первых двух шагов, представляют собой объективную информацию для структурно-параметрического описания геометрической формы поверхности КТЭ нижнего уровня, которые наиболее распространены в деталях машиностроения. Сформированные матрицы данных применимы не только для создания шаблонов отдельных КТЭ, но и для разработки логических правил и алгоритмов описания комбинаций КТЭ, составляющих целостное представление о структуре поверхностей деталей.

**Шаг 3. Описание параметров с нечеткими значениями.** Параметры, имеющие нечеткие значения записываются в матрицы относительных размеров, значимости отсеков, инвариантности отсеков, назначения КТЭ, названия КТЭ. Относительность размеров рассматривается в соответствии с набором понятий нечетких переменных: {«Незначительный», «Средний», «Большой»}. Необходимость данной процедуры обусловлена тесной взаимосвязью размеров и формы поверхности. Так, например, в зависимости от соотношения длины и диаметра цилиндрического отсека цилиндрическая деталь может быть интерпретирована как ось (длинная) или диск (плоская). Определение значений нечеткой переменной может осуществляться посредством методики, описанной в [5]. На основании величины относительных размеров

принимается решение о значимости отсеков. Наиболее важный из них будет функциональным или конструктивным инвариантом. Соответственно инварианту присваивается назначение отсеков: {«Конструктивный», «Функциональный», «Технологический»}, а также конструкторско-технологического элемента в целом. Название КТЭ является наиболее субъективным фактором, имеющим зачастую противоречивые значения. На данном этапе исследований разработка методик и алгоритмов расчета параметров, имеющих нечеткие значения, находится на начальной стадии.

**Заключение.** Совокупность сформированных матриц, содержащих данные о геометрической конфигурации отсеков поверхности, составляют базу данных для построения шаблонов КТЭ деталей. Увеличение глубины декомпозиции поверхности до уровня отсеков повышает информативность описания геометрической формы КТЭ. Алгоритмизация описания геометрической формы и построения шаблонов КТЭ на основе их представления множеством отсеков поверхности позволит сократить количество ошибок при выполнении процедур автоматизированного описания и интерпретации технических объектов. Дальнейшие исследования связываются с разработкой методик и алгоритмов структурного описания родительских КТЭ и формализации нечетко заданных параметров.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. KDnuggets [Electronic resource] / ed. G. Piatetsky-Shapiro. – KDnuggets, 2013. – Mode of access: <http://www.kdnuggets.com>. – Date of access: 07.02.2013.
2. Тарасов, А.Ф. Информационная технология поиска аналогов изделий в хранилищах метаданных о CAD-проектах / А.Ф. Тарасов, М.А. Винников, С.А. Тарасов, О.А. Лябик // Наукові праці ДонНТУ / ДонНТУ. – Донбасс, 2010. – Вип. 171. – С. 118–127.
3. Полозков, Ю.В. Автоматизация ввода геометрической информации для рекурсивного формообразования нерегулярных объектов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12 / Ю.В. Полозков. – Минск, 2009. – 177 л.
4. Падун, Б.С. Методы решения задач интеграции CAD и CAPP систем / Б.С. Падун, В.С. Кишкурно // Труды шестой сессии междунар. науч. школы «Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем» / ИПМаш РАН; под ред. Б.С. Падуна. – СПб., 2003. – Ч. 2. – С. 145–149.
5. Аверченков, А.В. Автоматизация распознавания и идентификации конструкторско-технологических элементов деталей в интегрированных САПР: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12 / А.В. Аверченков. – Брянск, 2004. – 260 л.
6. Жога, В.Л. Автоматизация процедуры классификации деталей в интегрированных САПР с использованием нейронных сетей: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12 / В.Л. Жога. – Брянск, 2005. – 177 л.
7. Автоматизация проектно-конструкторских работ и технологической подготовки производства в машиностроении / Под общ. ред. О.И. Семенкова. – Минск: Вышэйшая школа, 1977. – Т. 2. – 336 с.
8. Радзевич, С.П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории: монография / С.П. Радзевич. – Киев: Растан, 2001. – 592 с.
9. Benhabib, B. Manufacturing-design, production, automation and integration / B. Benhabib // Marcel Dekker, Inc. [Electronic resource]. – 2003. – 587 p. – Mode of access: <http://http://bookfi.org/gq/Benhabib>. – Date of access: 23.03.2013.
10. Sreeramulu, D. A new methodology for recognizing features in rotational parts using STEP data exchange standard / D. Sreeramulu, C.S.P. Rao // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2011. – Vol. 3. – № 6. – P. 102–115.

Материал поступил в редакцию 30.08.13

#### POLOZKOV Yu.V., EVTUSHENKO A.V. Algorithmization of the description of design-engineering parts geometrical form of products by simple shapes

The problem of automatic description of form features of design-engineering parts surface of products is considered. The formalized description model of design-engineering parts through combining simple shapes is offered. In order to create templates of design-engineering parts by this model the general technique of algorithmization is described.