

Полозков Ю.В., Ештушенко А.В.

## 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 CAPP 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.

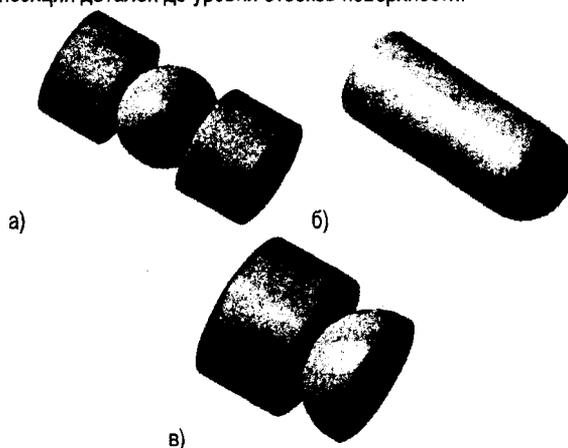
Для описания КТЭ используются параметры формы, размерные параметры (шероховатость поверхности, отклонения от правильной геометрической формы), физико-механические свойства. Набор параметров математического описания формы КТЭ детали включает длину КТЭ, измеряемую относительно оси вращения детали ( $L$ ), 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 поверхности 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.

Ештушенко 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]

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

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.

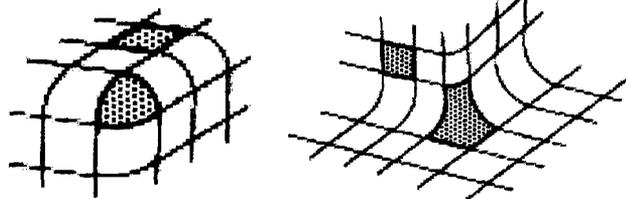


Рис. 2. Примеры отсеков обрабатываемой поверхности детали [8]

Отсек поверхности описывается следующим набором:

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

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 ( $\rho: (S, O_S) \rightarrow Q_P$ ):

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

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 оп-

ределения 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:  $i = \overline{1, m-1}, j = \overline{i+1, m}$ .

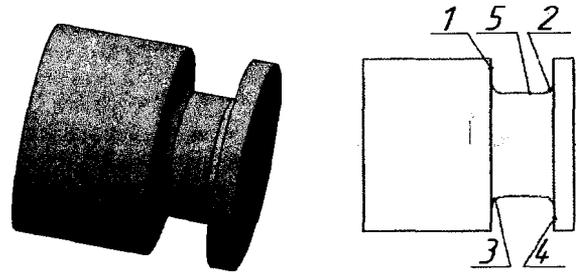
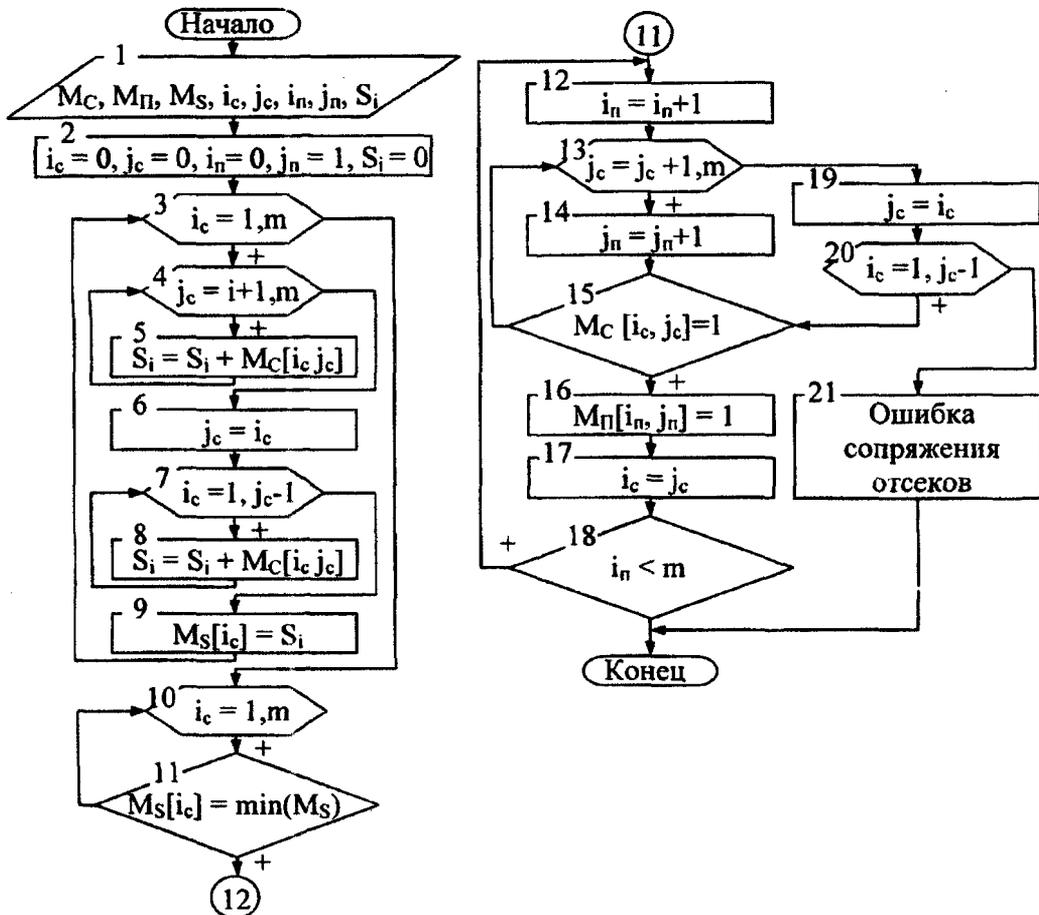


Рис. 3. Поверхность прямоугольной канавки цилиндрической детали

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

Аналогично формируется матрица смежности отсеков. В ячейках матрицы смежности на пересечении соответствующих строк и



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

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

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

$M_P$	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/q/ Beno%20Benhabib](http://http://bookfi.org/q/ Beno%20Benhabib). – 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.