

УДК 519.677:629.914.3-529

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ  
ДЛЯ ОБРАБОТКИ РАБОЧИХ КОЛЕС ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ  
НАСОСОВ НА ПЯТИКООРИНАТНОМ СТАНКЕ С ЧПУ

Н.Н. Павлов, В.А. Скороспелов

Расчет управляющих программ является основной проблемой, которая возникает при использовании многокоординатных станков с ЧПУ для обработки различных изделий. Совершенно очевидно, что рассчитать несколько тысяч точек траектории и представить их в виде управляющих кодов на перфоленте, не прибегая к помощи ЭВМ, невозможно. Однако привлечение ЭВМ для решения этой проблемы требует специального программного обеспечения, разработка которого включает:

- выбор метода математического моделирования изделия;
- разработку алгоритмов численного решения разнообразных задач геометрии;
- определение способа общения с программным обеспечением.

В [1] представлена автоматизированная система, созданная в Институте математики СО АН СССР для выполнения геометрических расчетов в различных научно-технических проблемах. Систему можно считать универсальной в том смысле, что она может быть адаптирована к конкретной предметной области. Так, например, она успешно применена для решения задач проектирования и подготовки производства лопастей гидротурбин, для изготовления технологической оснастки в авиастроении.

В настоящей статье описывается методика расчета управляющих программ для обработки рабочих колес циркуляционных насосов на пятикоординатном станке с ЧПУ, которая также реализована в рамках этой системы. Основная идея предлагаемой методики состоит в том, что на этапе конструирования создается математическая модель колеса, которая используется при проведении всех расчетов, связанных с получением управляющих программ. Математическая модель колеса - не-

который сплайн, принятый в качестве стандартной формы представления поверхностей в системе (см. [1, раздел 1]).

Применение методики на практике обеспечивает высокую степень автоматизации проектирования и изготовления изделий этого класса.

## 1. Построение математической модели колеса

Общий вид колеса изображен на рис. 1. Под его математической моделью будем понимать поверхности основных элементов конструкции колеса - ступицы и лопасти, представленные в стандартной форме, о которой было сказано выше. Как следует из [1], для того чтобы поверхность представить в стандартной форме, достаточно определить на ней каркас, образованный совокупностью некоторых линий [5]. Таким образом, задача о построении математической модели колеса сводится к расчету каркасов поверхностей его элементов.

Свяжем с колесом прямоугольную систему координат  $(Oxyz)$ , направив ось  $z$  по оси вращения колеса в сторону нагнетания. Поверхность ступицы есть поверхность вращения. Если  $z = z(u)$ ,  $x = x(u)$ ,  $u \in [0, 1]$  - уравнение ее образующей, то уравнение самой поверхности имеет вид:

$$x = z(u) \cos(2\pi v), \quad y = z(u) \sin(2\pi v), \quad z = z(u), \quad u, v \in [0, 1].$$

Пусть  $\varepsilon$  - погрешность производимых расчетов. Разобьем область изменения параметров  $u$  и  $v$  так, чтобы шаг разбиения удовлетворял условию:

$$\Delta u \leq 4 \sqrt{\frac{\varepsilon}{k_{\max} S}}, \quad \Delta v \leq \sqrt{\frac{\varepsilon}{2\pi z_{\max}}},$$

где  $k_{\max}$  - максимальная кривизна образующей,  $S$  - длина дуги образующей,  $z_{\max} = \max_{u \in [0, 1]} z(u)$ . Совокупность линий на поверхности ступицы, соответствующая этому разбиению, принимается в качестве искомого каркаса.

Способ образования поверхности лопасти, применяемый в практике проектирования колес, состоит в формулировании закона преобразования теоретического профиля в цилиндрические сечения лопасти (сечения круговыми цилиндрами, соосными с колесом). Параметрами этого преобразования являются (рис. 2):  $R$  - радиус цилиндрического сечения,  $\ell$  - длина хорды развертки цилиндрического сечения,  $\beta$  - угол наклона хорды,  $R^*$  - радиус дуги развертки,  $A$  - абсцис-

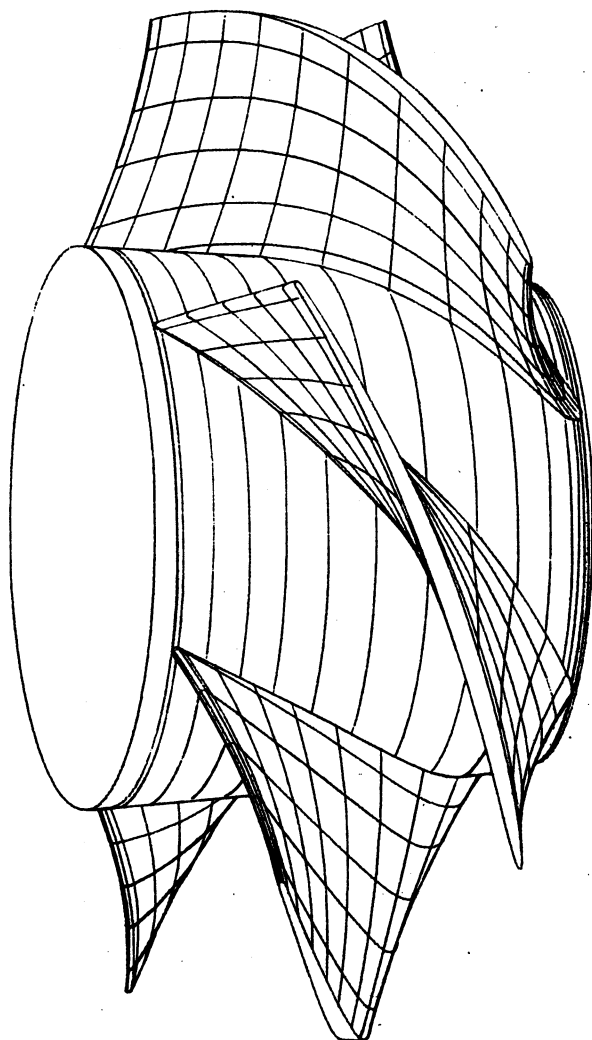


Рис. I. Общий вид колеса.

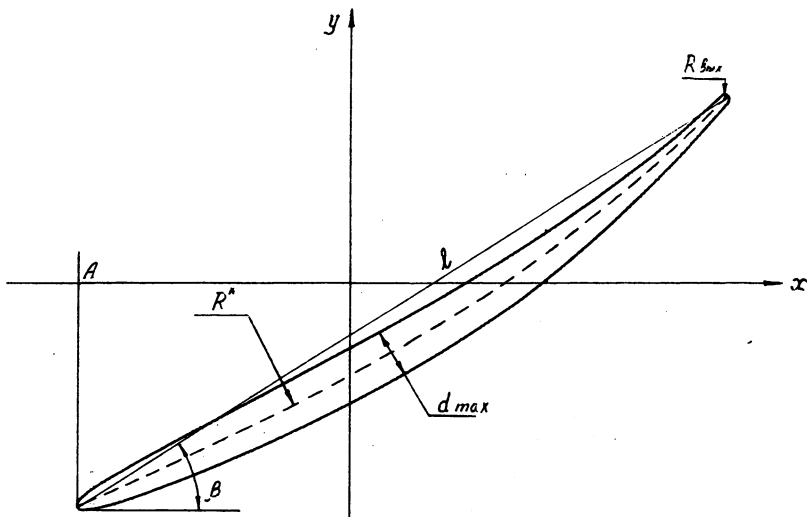


Рис. 2

са начальной точки хорды развертки,  $d_{max}$  - максимальная толщина развертки,  $R_{вых}$  - радиус окружности выходной кромки. Величины  $l$ ,  $R^*$ ,  $d_{max}$ ,  $R_{вых}$  задают деформацию теоретического профиля, а  $R$ ,  $\ell$ ,  $\beta$ ,  $A$  - его положение в пространстве.

Эти параметры, рассматриваемые как непрерывные дифференцируемые функции от  $R$ , вместе с уравнением дуги профиля  $\vec{r} = \vec{r}(t)$ ,  $t \in [0, 1]$ , где  $\vec{r} = (x, y)$  - радиус-вектор точки, представляют параметрическое уравнение поверхности лопасти. В качестве каркаса этой поверхности принимается совокупность параметрических линий  $t_i = \text{const}$ ,  $R_j = \text{const}$ ,  $j = \overline{1, M}$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

Рассмотрим более подробно процесс расчета каркаса поверхности лопасти. В качестве исходных данных принимаются:

- теоретический профиль, заданный таблицей координат его точек;

- таблица значений параметров  $P = \{R_j, \ell_j, \beta_j, R_j^*, A_j, d_{maxj}, R_{выхj}\}$ ,  $j \in \overline{1, M}$ .

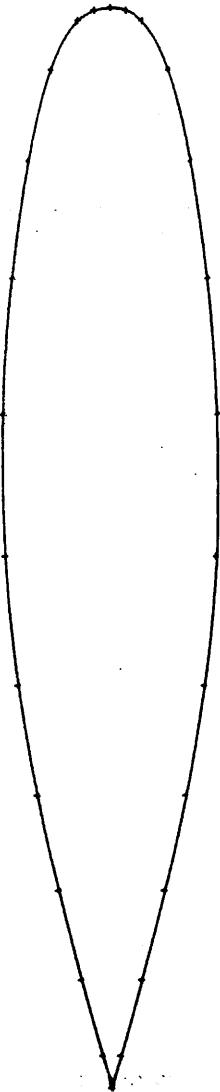


Рис. 3

Сначала определяется уравнение теоретического профиля в виде кубического параметрического сплайна  $\bar{z} = \bar{S}(t) = [S_x(t), S_y(t)]$ ,  $t \in [0, 1]$ , определенного на сетке  $\Delta: 0 = t_1 < t_2 < \dots < t_N = 1$  и аппроксимирующего исходную таблицу. Используемый здесь метод сплайн-аппроксимации описан в [2] - [3]. Следует отметить, что такой подход позволяет не только получить уравнение дуги профиля, но и выполнить сглаживание исходных точек, если это необходимо. Результат сплайн-аппроксимации профиля приведен на рис. 3. Крестиками отмечены узлы сплайна.

Таблица  $P$  задает набор цилиндрических сечений лопасти колеса. От того, насколько они хорошо увязаны в пространстве, зависит и качество получаемой поверхности. Поэтому значения параметров, представленные в таблице, предварительно сглаживаются по методу наименьших квадратов.

Цилиндрическое сечение лопасти получается в результате выполнения над теоретическим профилем следующих последовательных преобразований:

1. Преобразование "растяжения-сжатия" по осям  $x, y$  с тем, чтобы получить профиль необходимого размера:  $x_1 = \alpha x$ ,  $y_1 = \beta y$ , где  $\alpha = R^* \arcsin(l/2R^*)$ ,  $\beta = d_{\max}/4_{\max} 3_{\max}$  - максимальная толщина теоретического профиля.

2. Преобразование деформации, переводящее среднюю линию профиля из отрезка прямой в дугу окружности радиуса  $R^*$ :

$$x_2 = 0,5\alpha - A + (R^* - y_1) \sin(x_1/R^*),$$

$$y_2 = \sqrt{R^{*2} - (0,5l)^2} - (R^* - y_1) \cos(x_1/R^*).$$

3. Преобразование, устанавливающее деформированный профиль относительно осей лопасти в заданное положение:

$$x_3 = x_2 \cos \beta - y_2 \sin \beta - (2 - \cos \beta) A,$$

$$y_3 = x_2 \sin \beta + y_2 \cos \beta + 2 \cos(0,5\beta) - A \sin \beta.$$

4. Вписывание выходной окружности радиуса  $R_{вых}$ . Процедура вписывания показана на рис. 4 и выполняется так, что размеры лопасти в плане не изменяются. При этом некоторой деформации подвер-

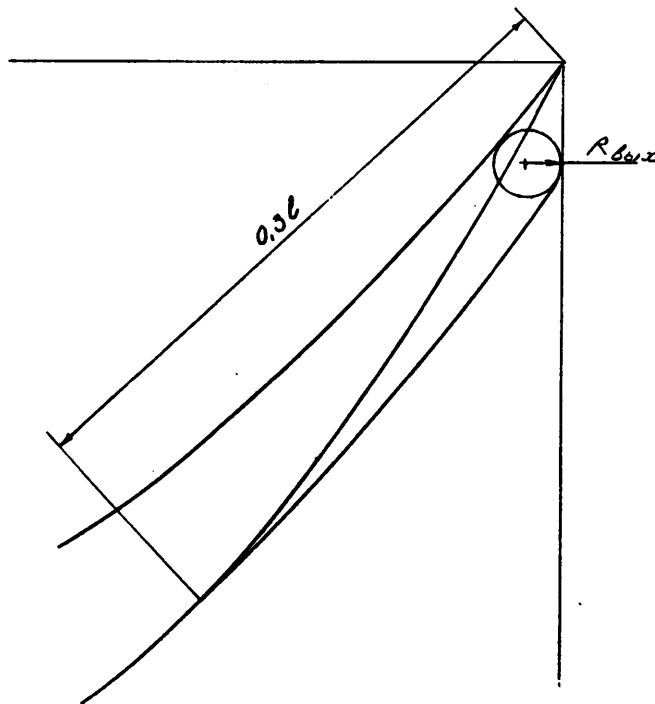


Рис. 4

гается развертка сечения по стороне всасывания на расстоянии  $0,3\ell$  от выходной кромки.

5. Преобразование полученной развертки в цилиндрическое сечение лопасти:  $x = R \cos(x_3/R)$ ,  $y = R \sin(x_3/R)$ ,  $z = y_3$ .

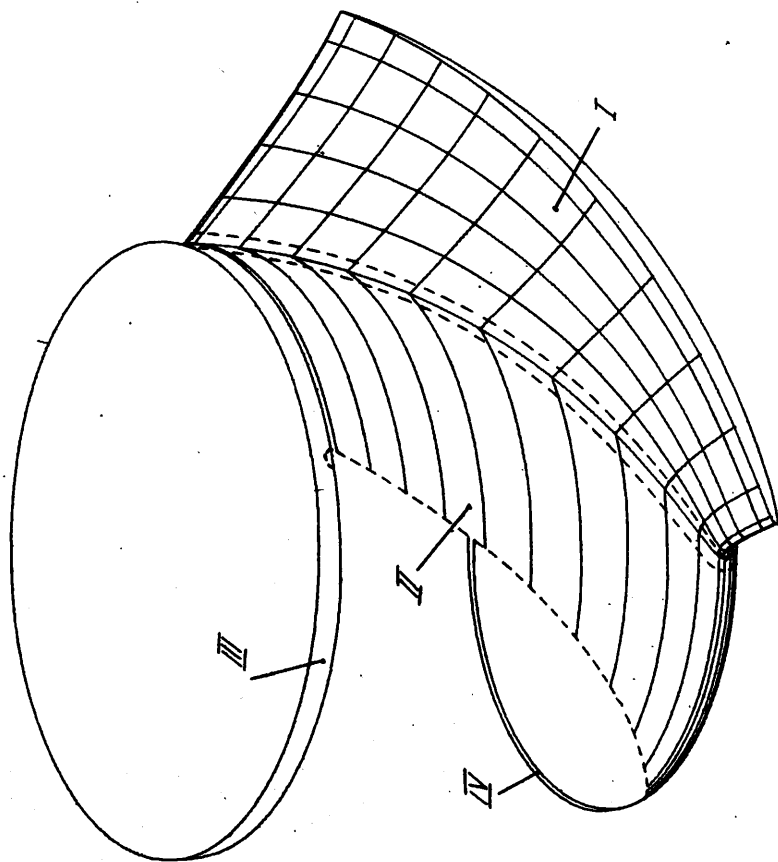


Рис.5. Области обработки на поверхности колеса.

Рассчитанный таким образом набор цилиндрических сечений лопасти принимается в качестве одного из семейств каркасных линий. Линия второго семейства с номером  $z, z = \overline{1, N}$ , получается путем кубической сплайн-интерполяции по точкам, цилиндрических сечений, соответствующих  $z$ -му узлу сетки  $\Delta, \{z_j(t_z)\}, j = \overline{1, M}$ . Применяемый здесь метод кубической сплайн-интерполяции описан в [4].

Каркасы поверхностей элементов колеса сохраняются в банке данных системы и используются при проведении дальнейших расчетов.

## 2. Расчет управляющей информации

Поскольку колеса обладает осевой симметрией  $L$ -го порядка ( $L$  - число лопастей), достаточно рассчитать управляющие программы для обработки следующих областей его поверхности (рис. 5):

- поверхности лопасти (I);
- части поверхности ступицы (II), заключенной между двумя соседними лопастями колеса;
- части поверхности ступицы (III), примыкающей к выходным кромкам лопасти;
- части поверхности ступицы (IV), примыкающей к входным кромкам лопасти.

В дальнейшем будем называть их областями обработки.

Предварительно для каждой из этих областей рассчитываются границы и каркас так, чтобы одно из семейств его линий совпадало со строками обработки. Это позволит вести обработку вдоль параметрических линий сплайна, определенного на этом каркасе, что существенно упрощает расчет траектории инструмента.

В качестве границ областей обработки I и II принимается след точки касания шара заданного размера, когда он катится одновременно по обеим поверхностям. На рис. 5 эти линии обозначены пунктиром. Этим обеспечивается воспроизведение поверхности галтельного перехода, гладко сопрягающей поверхности лопасти и ступицы, без предварительного ее описания.

Для обработки поверхности лопасти предусмотрены две схемы: "винт" и "винт-М" (рис. 6, "а", "б", соответственно). В обеих схемах обработка ведется строками вдоль цилиндрических сечений лопасти. Переход от строки к строке осуществляется вне заготовки. Поверхность выходной кромки не обрабатывается. В схеме "винт-М", как видно из рис. 6, не обрабатывается и поверхность входной кромки.

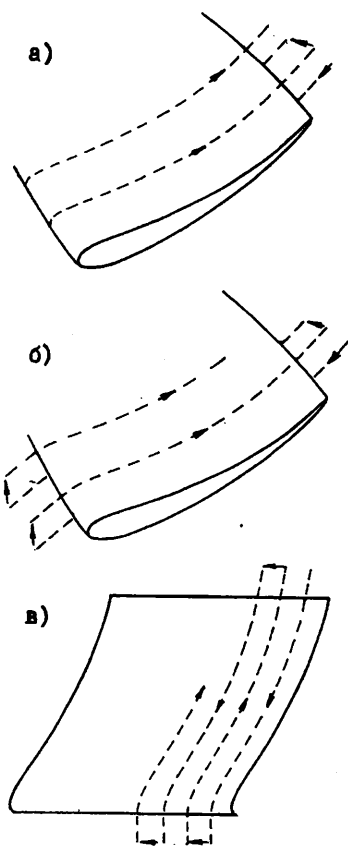


Рис. 6

Обработка области II на ступице ведется по схеме "зигзаг" (см. рис. 6, а) строками вдоль потока. Переход от строки к строке выполняется вне заготовки.

Области III и IV обрабатываются по схеме "винт", но при переходе от строки к строке фреза остается в контакте с заготовкой.

Траектория инструмента рассчитывается с учетом того, что колесо обрабатывается фрезами с шаровым концом. Положение такой фрезы в пространстве будем определять радиусом-вектором ее концевой точки  $\vec{r}$  и вектором направления ее оси  $\vec{q}$ , ориентированным к шпинделю.

Требования к положению инструмента во время обработки состоит в следующем:

а) вектор  $\vec{q}$  в каждой точке обрабатываемой поверхности должен быть направлен так, чтобы инструмент находился в контакте с металлом только своей рабочей частью и была исключена возможность контакта шпинделя и нерабочей части фрезы с заготовкой;

б) если  $\vec{\tau}$  - вектор движения центра фрезы, то в каждой точке траек-

тории должно выполняться соотношение  $\vec{\tau} \cdot \vec{q} = 0$ , т.е. угол между этими векторами должен быть меньше  $\pi/2$ , что исключает возможность движения фрезы в направлении вектора  $-\vec{q}$ .

Пусть  $\vec{n}$  - единичный вектор внешней нормали к обрабатываемой поверхности в точке  $\vec{r}$ ,  $\vec{\rho} = [\vec{\tau}, \vec{n}]$ , тогда вектор  $\vec{q}$  определяется формулой

$$\vec{q} = \vec{\rho} \cos \alpha + \vec{n} \sin \alpha, \quad (I)$$

где  $\alpha$  есть угол наклона вектора  $\vec{q}$  к касательной плоскости, который рассчитывается с учетом условия "а". Очевидно, что условие "в" выполняется автоматически.

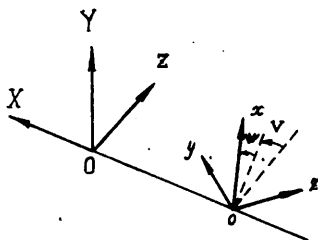


Рис. 7

Добавив к (I) формулу вычисления координат концевой точки фрезы  $\vec{F} = \vec{r} + D\vec{n} - R_f \vec{q}$ , где  $D = R_f + \delta$ ,  $R_f$  - радиус шаровой части фрезы,  $\delta$  - припуск на последующую обработку, получаем уравнение траектории инструмента в координатах колеса.

Для того чтобы обеспечить перемещение фрезы относительно детали по рассчитанной траектории, станок, используемый для обработки колес, должен иметь не менее пяти программируемых координат. Три из них  $-X, Y, Z$  - линейные, а две другие  $-V, W$  - угловые. Ось вращения одной из угловых координат должна совпадать с осью вращения колеса.

Связь координат колеса с координатами станка, который был принят за основу при расчете управляющей информации, показана на рис. 7. Если  $\vec{F} = (F_x, F_y, F_z)$  и  $\vec{q} = (q_x, q_y, q_z)$  - параметры, определяющие положение фрезы относительно детали, то значения координат станка, соответствующие этому положению фрезы, подсчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} \sin V &= -q_x, & \sin W &= q_y / \cos V, \\ \cos V &= \sqrt{q_x^2 + q_y^2}, & \cos W &= q_z / \cos V, \\ \vec{Q} = (X, Y, Z) &= M \cdot \vec{F} - \vec{O}, \end{aligned}$$

где

$$M = \begin{pmatrix} -\cos W \cdot \sin V & -\sin W \cdot \sin V & -\cos V \\ \sin W & \cos W & 0 \\ q_x & q_y & q_z \end{pmatrix},$$

$$\vec{O} = (-h, 0, 0).$$

Для реализации изложенной методики в рамках автоматизированной системы, о которой было сказано выше, потребовалось дополнительно создать и включить в состав программного обеспечения системы девять программ. Четыре из них выполняют расчет математической модели колеса и областей обработки. Остальные пять - реализуют технологические операторы языка системы и предназначены для расчета

управляющих программ, соответствующих следующим технологическим переходам обработки колеса на станке с ЧПУ:

- подрезка кромок;
- черновая и чистовая обработки лопасти;
- черновая и чистовая обработки части II на ступице;
- обработка поясков ступицы (части III и IV).

Для проведения всех расчетов достаточно задать: теоретический профиль, таблицу параметров цилиндрических сечений лопасти, образующую поверхности ступицы и технологические параметры процесса обработки.

Все расчеты можно выполнить в несколько этапов. При этом программные средства управления данными системы обеспечивают надежное хранение промежуточных результатов и передачу данных соответствующим программам.

Дополнительно реализована возможность рассчитывать необходимую информацию для изготовления рабочего чертежа колеса, используя его математическую модель.

## Л и т е р а т у р а

1. ВАЙСБЕРГ Г.В., КОВАЛЕВА Л.Г., ПАВЛОВ Н.Н., СКОРОСПЕЛОВ В.А., ТУРУК П.А. Автоматизированная система проектирования и технологической подготовки производства. - В кн.: Методы сплайн-функций. (Вычислительные системы, вып. 68.) Новосибирск, 1976, с. 100-116.
2. ПАВЛОВ Н.Н., СКОРОСПЕЛОВ В.А. Аппроксимация поверхностей лопасти гидротурбины. - В кн.: Методы сплайн-функций. (Вычислительные системы, вып. 72.) Новосибирск, 1977, с. 58-64.
3. ПАВЛОВ Н.Н. К вопросу об аппроксимации пространственных кривых кубическими параметрическими сплайнами. - В кн.: Методы сплайн-функций (Вычислительные системы, вып. 75.) Новосибирск, 1978, с. 45-49.
4. СКОРОСПЕЛОВ В.А. Кубическая сплайн-интерполяция как средство приближения пространственных кривых. - В кн.: Методы сплайн-функций (Вычислительные системы, вып. 75.) Новосибирск, 1978, с. 36-44.
5. ЛЕУС В.А. Каркасы на гладких поверхностях. - В кн.: Методы сплайн-функций (Вычислительные системы, вып. 68.) Новосибирск, 1976, с. 67-73.

Поступила в ред.-изд. отд.

21 ноября 1979 года