



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ  
ПРИ ГКНТ СССР

# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

## К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

(21) 4274473/31-08

(22) 01.07.87

(46) 30.07.89. Бюл. № 28

(71) Белорусский политехнический институт

(72) И.П.Филонов, В.И.Юринок,  
Т.С.Трофимчук и Р.Ф.Наумович

(53) 621.941 (088.8)

(56) Авторское свидетельство СССР  
№ 1414581, кл. В 24 В 13/00, 1986.

(54) СПОСОБ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

(57) Изобретение относится к технологии обработки сферических поверхностей и может найти применение в оптической промышленности на станках с программным управлением. Цель изоб-

Изобретение относится к обработке сферических поверхностей и может найти применение в оптической промышленности для обработки линз, а также для обработки сферических поверхностей, связанных со стержнем, в частности сферических кинематических пар манипуляторов и шаров большого диаметра.

Целью изобретения является повышение производительности и качества обработки за счет рационального использования алмазного или полировального инструмента и повышения его размерной стойкости.

На фиг. 1 изображена схема разбиения поверхности инструмента на сфери-

ретения - повышение производительности и качества обработки за счет рационального использования алмазного или полировального инструмента и повышения его размерной стойкости. Определяют закон изменения угловой скорости вращения верхнего звена (инструмент) в процессе всего цикла обработки с учетом роста фактической площади контакта во времени и расположения его относительно нижнего (деталь). По сигналу рассогласования действительной частоты вращения инструмента в сравнении с расчетной изменяют силу прижима. Силу прижима увеличивают, если действительная угловая скорость меньше расчетной, и уменьшают, если она больше. 7 ил.

ческие пояса окружностями; на фиг. 2 - схема разбиения поверхности детали на сферические пояса детали; на фиг. 3 - геометрия сопряженных поверхностей; на фиг. 4 - схема, позволяющая определить количество точек пересечения и касания верхнего и нижнего звеньев; на фиг. 5 - схема расположения осей естественных трехгранников Френе; на фиг. 6 - вид А на фиг. 5; на фиг. 7 - расчетная угловая скорость верхнего звена за время обработки.

Предлагаемый способ заключается в том, что обрабатываемую поверхность детали и рабочую часть инструмента разбивают на окружности с центрами, совпадающими с их осями

вращения (см. фиг. 1 и 2). Для инструмента 1 эта разбивка производится по формулам

$$\left. \begin{aligned} r_i &= R_{c\phi} \sin(\Delta_k + \delta_i); \\ i &= 1, 2, \dots, n; \delta_i = i\delta \end{aligned} \right\} (1) \quad 5$$

где  $R_{c\phi}$  - радиус сферической поверхности; 10

$\Delta_k$  - угол между осями вращения детали 2 и инструмента 1;

$n$  - число всех окружностей инструмента; 15

$\delta$  - шаг по углу, причем  $\delta$  выбирается таким образом, что окружности касаются и пересекаются в соответствующих точках. 20

Радиусы концентрических окружностей на обрабатываемой поверхности детали 2 определяются формулами

$$\left. \begin{aligned} R_j &= R_{c\phi} \sin \Delta_j; \\ j &= 1, 2, \dots, m; \Delta_j = j\delta \end{aligned} \right\} (2,3) \quad 25$$

Такое разбиение сопряженных сферических поверхностей позволяет выделить сопряженные точки  $(i, j)$  как точки пересечения соответствующих окружностей (см. фиг. 3). 30

Конечным результатом способа является изменение величины силы прижима в соответствии с угловой скоростью вращения верхнего звена (инструмента) из условия контактирования сопряженных поверхностей. 35

При обработке методом свободного притира скорость вращения верхнего звена (инструмента) изменяется как в процессе приработки, связанной с увеличением площади фактического контакта, так и в связи с изменением угла  $\Delta_k$  между осью вращения детали (нижнего звена) и осью вращения инструмента. Силами, вызывающими вращение инструмента вокруг оси симметрии, являются силы трения в зоне контакта инструмента и детали. 40

Для определения зависимости угловой скорости вращения верхнего звена от сил трения в зоне контакта при обработке оптических деталей методом свободного притира воспользуемся соотношением 50

$$I_n \frac{d\omega_B}{dt} + \frac{\omega_B^2}{2} \frac{dI_n}{d\varphi_B} = (M_{AB})_n - (M_C)_n; (4) \quad 55$$

где  $I_n$  - приведенный момент инерции;  
 $\omega_B$  - угловая скорость звена приведения (в данном случае это верхнее звено);  
 $t$  - время обработки;  
 $\varphi_B$  - угол поворота звена приведения;  
 $(M_{AB})_n$  - приведенный момент движущих сил верхнего звена;  
 $(M_C)_n$  - приведенный момент сил сопротивления верхнего звена.

Из рассмотрения физических явлений, происходящих в зоне контакта верхнего и нижнего звеньев, следует, что

$$(M_{AB})_n = M_{AB}^B; (M_C)_n = M_{TP}^B + M_C^B.$$

Из условия сохранения кинетической энергии с учетом нежесткой связи верхнего и нижнего звеньев имеет место равенство

$$I_n \frac{\omega_B^2}{2} = I_B \frac{\omega_B^2}{2} + m_B \frac{V_B^2}{2},$$

откуда

$$I_n = I_B + m_B \left(\frac{V_B}{\omega_B}\right)^2, (5)$$

где  $I_B$  - момент инерции верхнего звена;

$V_B$  - линейная скорость поступательного движения верхнего звена.

Производимую приведенного момента инерции вычислим по формуле

$$\frac{dI_n}{d\varphi_B} = \frac{1}{\omega_B} \cdot \frac{dI_n}{dt}$$

Тогда, дифференцируя равенство (5) по времени, имеем

$$\frac{dI_n}{d\varphi_B} \frac{1}{\omega_B} - 2m_B \left(\frac{V_B}{\omega_B}\right) \left[ \frac{\frac{dV_B}{dt} \omega_B - \frac{d\omega_B}{dt} V_B}{\omega_B^2} \right],$$

или

$$\frac{dI_n}{d\varphi_B} = \frac{d\omega_B}{dt} (-2m_B \left(\frac{V_B}{\omega_B}\right)^2) + 2 \frac{V_B}{\omega_B} m_B \frac{dV_B}{dt}. (6)$$

Подставляя (5) и (6) в уравнение (4), получим дифференциальное уравнение вида

$$\begin{aligned} \frac{1}{\omega_B^2} \frac{d\omega_B}{dt} [I_B \omega_B^2 - m_B V_B^2] = \\ = M_{AB}^B - M_{TP}^B - M_C^B - 2 \frac{V_B}{\omega_B} m_B \frac{dV_B}{dt}. \end{aligned}$$

Окончательное уравнение для определения угловой скорости верхнего звена имеет вид

$$\frac{1}{\omega_B^2} \frac{d\omega_B}{dt} = \frac{M_{AB}^B - M_{TP}^B - M_C^B - 2 \frac{V_B}{\omega_B} m_B \frac{dV_B}{dt}}{I_B \omega_B^2 - m_B V_B^2},$$

причем из условия протекания процесса обработки методом свободного притира удобнее это записать в виде задачи Коши

$$\frac{1}{\omega_B^2} \frac{d\omega_B}{d\Delta_k} = \frac{M_{AB}^B - M_{TP}^B - M_C^B - 2 \frac{V_B}{\omega_B} m_B \frac{dV_B}{dt}}{I_B \omega_B^2 - m_B V_B^2} \cdot \frac{dt}{d\Delta_k};$$

$$\omega_B \Big|_{\Delta_k = 0} = \omega_H \quad (7)$$

Для реализации способа автоматического управления процессом обработки сферических поверхностей рассмотрим определение входящих в (7) величин, которые зависят как от степени приработки, так и от взаимного расположения.

Пусть верхнее звено имеет диаметр  $D_B$ , тогда максимальный угол верхнего звена равен

$$\Delta_{\max}^B = \arcsin \frac{D_B}{2R_{cp}}.$$

Для нижнего звена, соответственно,

$$\Delta_{\max}^H = \arcsin \frac{D_H}{2R_{cp}},$$

где  $D_H$  - диаметр нижнего звена.

Шаг разбиения окружностей определим из условия, что на нижнем звене  $m$  окружностей. Тогда

$$\delta = \left[ \frac{\Delta_{\max}^H}{m} \right].$$

Здесь квадратные скобки указывают целую часть выражения. В соответствии с этим шагом на верхнем звене  $p$  окружностей:

$$p = \left[ \frac{\Delta_{\max}^B}{\delta} \right].$$

С учетом угла  $\delta$  можно записать, что  $\Delta_k = k \delta$ ,  $1 \leq k \leq m$ , если учесть, что ось инструмента при обработке почти не выходит за край детали, но последнее ограничение не нарушает общности;  $m_j$  - число пересечений и касаний  $j$ -й окружности нижнего звена с окружностями верхнего звена. Из фиг. 4 видно, что для

третьей окружности нижнего звена  $m_3 = 7$ . Тогда число всех пересечений нижнего звена с верхним определяется выражением

$$\sum_{j=1}^m m_j,$$

где  $m$  - число всех окружностей нижнего звена;

$n_i$  - число пересечений и касаний  $i$ -й окружности верхнего звена с окружностями нижнего звена.

Для третьей окружности верхнего звена  $n_3 = 9$ . Число всех точек пересечения верхнего звена с нижним равно

$$\sum_{i=1}^n n_i,$$

где  $n$  - число всех окружностей верхнего звена.

Очевидно, что в любой момент времени обработки должно выполняться равенство

$$\sum_{j=1}^m m_j = \sum_{i=1}^n n_i = \bar{S}_{km},$$

где  $\bar{S}_{km}$  - число всех точек пересечения окружностей верхнего и нижнего звеньев.

Для заданного значения  $\Delta_k = k \delta$  при условии, что определено  $n$ , число точек  $i$ -й окружности  $S_{ikm}$  определяется равенством

$$S_{ikm} = \begin{cases} 4 \min(i, k), & 1 \leq i \leq \min(n, m_k), \\ 4 \min(i, k) - \{1 + 2[i - (m - k + 1)]\}, & m - k + 1 \leq i \leq n. \end{cases} \quad (8)$$

Зависимость (8) позволяет определить  $\bar{S}_{km}$ , а именно

$$\bar{S}_{km} = \sum_{i=1}^n S_{ikm} + 1.$$

Момент сил сопротивления верхнего звена есть сумма моментов сил сопротивления в каждой рассматриваемой точке, т.е.

$$M_e^B(t, \Delta_k) = \frac{P f}{S_{km}} R_{cp} \sum_{i=1}^n \sin i \delta \cdot S_{ikm}, \quad (9)$$

где  $P$  - сила прижима;

$f$  - коэффициент трения в зоне контакта.

Для определения момента сил, движущих верхнее звено, рассмотрим проекцию силы трения  $|\vec{F}_j| = \frac{P f}{S_{km}}$ , направ-

ленной по оси  $\vec{c}_j$  естественного трехгранника Френе (см. фиг. 5 и 6), на ось  $\vec{c}_i$  трехгранника  $\vec{c}_i, \vec{v}_i, \vec{w}_i$ , имеющих общее начало. Так как  $\vec{M}_i = \vec{r}_i \times \vec{F}_i$ , то величина момента сил трения в точке d (см. фиг. 5) определяется равенством

$$|\vec{M}_i| = |\vec{r}_i| \cdot |\vec{F}_i| \cdot \sin(\widehat{r_i, F_i}).$$

Но, с другой стороны,

$$\cos(\widehat{r_i, R_j}) = \frac{\sin^2 \Delta_j + \sin^2 \delta_j - \cos^2 \Delta_j - \cos^2 \delta_j + 2 \cos \Delta_j \cos \Delta_k \cos \delta_j}{2 \sin \Delta_j \sin \delta_j}.$$

Рассмотрев все точки пересечения в пространстве j-х окружностей нижнего звена с i-ми окружностями верх-

него звена, получим, что момент сил, движущих верхнее звено, определяется зависимостями:

$$M_{AB}^b(t, \Delta_k) = \frac{P f}{S_{km}} R_{c\phi} \left[ \sum_{i=1}^{\min(n, m-k)} \sin i \delta \cdot (\cos \beta_{i|i-k|} + \cos \beta_{i|i+k|} + 2 \sum_{j=|i-k|+1}^{i+k-1} \cos \beta_{ij}) + \sum_{i=m-k+1}^n \sin i \delta (\cos \beta_{i|i-k|} + 2 \sum_{j=|i-k|+1}^m \cos \beta_{ij}) \right];$$

$$\cos \beta_{ij} = \frac{2 \cos j \delta \cdot \cos i \delta \cdot \cos k \delta - \cos 2j \delta - \cos 2i \delta}{2 \sin i \delta \sin j \delta},$$

$$j \neq |i-k|, |i+k|,$$

$$\cos \beta_{i|i-k|} = -1, \cos \beta_{i|i-k|} + \cos \beta_{i|i+k|} = 0, i-k < 0$$

$$\cos \beta_{i|i-k|} = 0, \cos \beta_{i|i-k|} + \cos \beta_{i|i+k|} = 1, i = k$$

$$\cos \beta_{i|i-k|} = 1, \cos \beta_{i|i-k|} + \cos \beta_{i|i+k|} = 2, i > k$$
(10)

Значение  $M_{тр}$  оценивается приближенно или определяется экспериментально. Все остальные величины, входящие в систему (7), известны. Таким образом, повышение размерной стойкости инструмента и равномерности износа обрабатываемой поверхности достигается при обеспечении прилагаемого усилия к верхнему звену в соответствии с угловой скоростью верхнего звена.

Решение задачи (7) позволяет определить зависимость  $\omega_g$  как от степени приработки (изменение величины  $M_{AB}^b, M_c^b, M_{тр}^b$ ) угла  $\Delta_k$  между

$$\sin(\widehat{r_i, F_j}) = \cos(r_i, R_j).$$

По теореме косинусов

$$O_j O_i^2 = (R_{c\phi} - h_j)^2 + (R_{c\phi} - h_i)^2 - 2(R_{c\phi} - h_j) \cdot (R_{c\phi} - h_i) \cdot \cos \Delta_k$$

и

$$O_i O_j^2 = R_j^2 + r_i^2 - 2R_j r_i \cos(\widehat{r_i, R_j}).$$

Отсюда

45

осью вращения инструмента (верхнее звено) и осью вращения детали (верхнее звено), так и в условиях полной приработки, когда формирование поверхности происходит притертым инструментом.

50

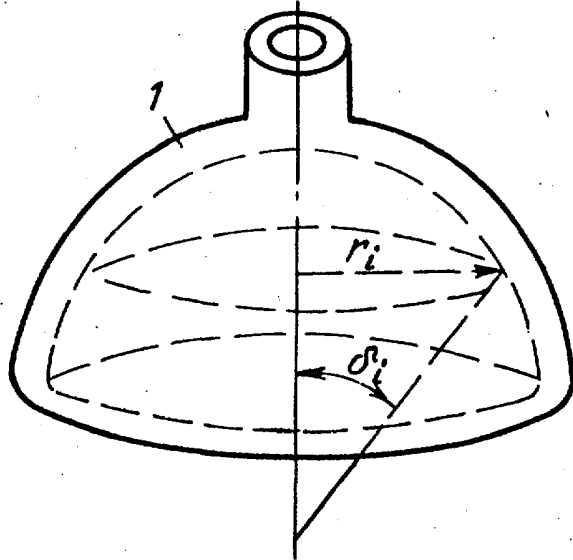
Таким образом, система уравнений (7) - (10) позволяет установить взаимосвязь силовых и кинематических характеристик процесса формообразования поверхностей оптических деталей методом свободного притира.

55

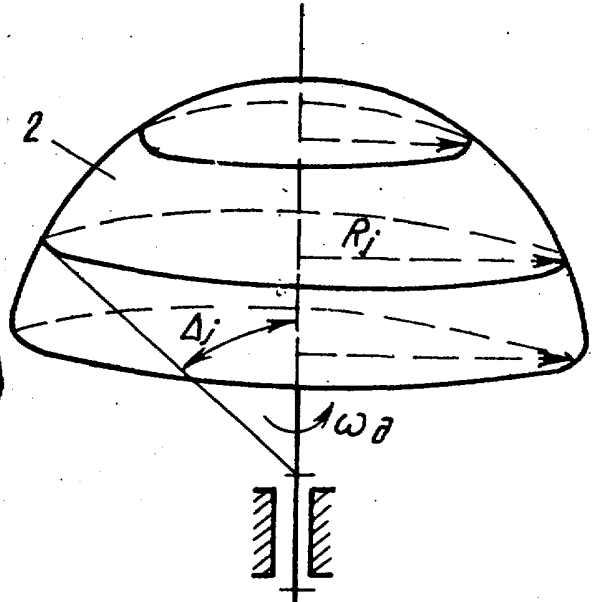
**Ф о р м у л а и з о б р е т е н и я**  
Способ автоматического управления процессом обработки сферических поверхностей, при котором на первом

этапе обработку осуществляют с минимальной силой прижима вращающегося инструмента, на втором - с максимальной силой прижима и на третьем вновь с минимальной силой прижима, отличающийся тем, что, с целью повышения производительности и качества обработанной поверх-

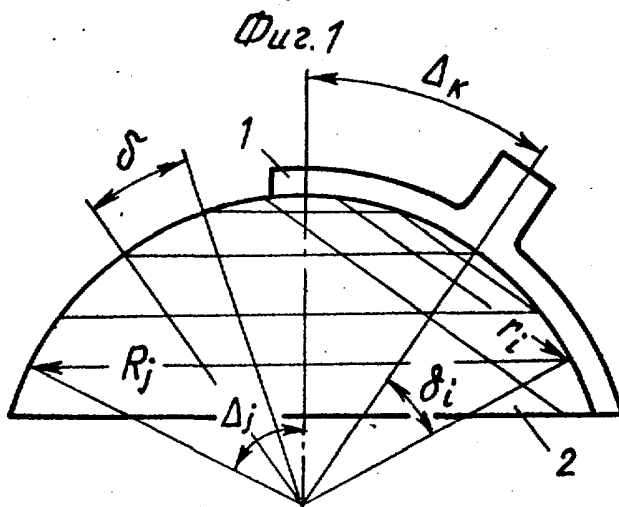
ности, измеряют частоту вращения инструмента в процессе всего цикла обработки, сравнивают с расчетной и по сигналу рассогласования между ними изменяют силу прижима, при этом в случае превышения частоты вращения ее расчетного значения силу прижима увеличивают.



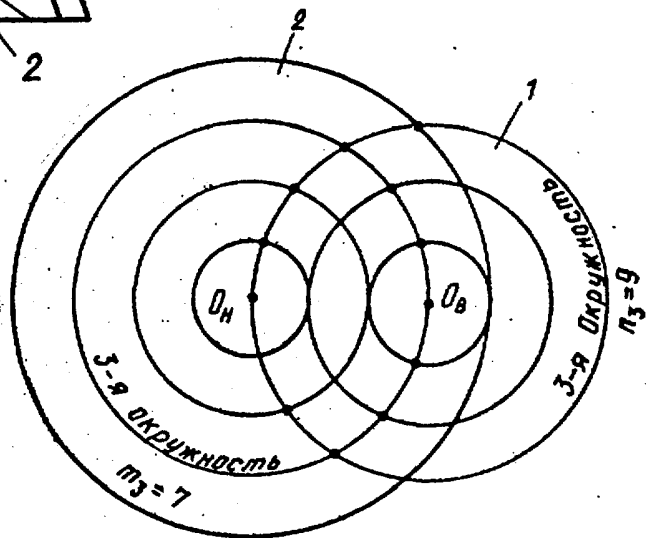
Фиг. 1



Фиг. 2

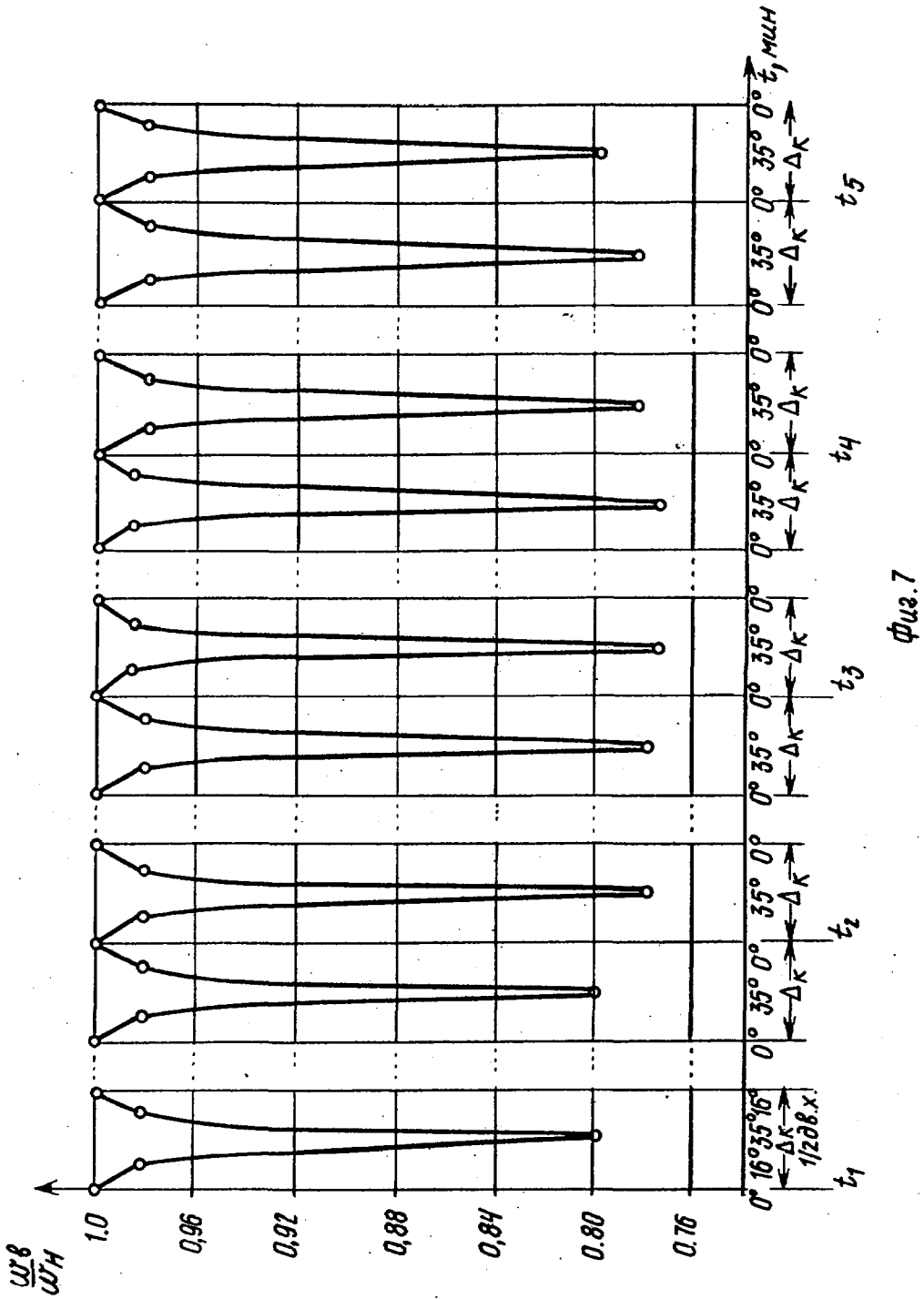


Фиг. 3



Фиг. 4





Редактор И.Рыбченко                      Составитель А.Семенова  
 Техред М.Ходанич                      Корректор О.Кравцова  
 -----  
 Заказ 4379/18                      Тираж 662                      Подписное  
 ВНИИПИ Государственного комитета по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР  
 113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5

-----  
 Производственно-издательский комбинат "Патент", г. Ужгород, ул. Гагарина, 101.