

УДК 681.7.056: 681.7.053.45: 681.7.023.[72+73]

Метод расчёта скорости перемещения малоразмерного инструмента при формообразовании прецизионных оптических поверхностей

© 2019 г. **В. Н. Чекаль**

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл.

E-mail: chekal@nioer.ru

Поступила в редакцию 01.04.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-08-XX-XX

Приведено описание способа расчёта управляющей программы для станков, предназначенных для исправления формы оптических поверхностей малоразмерным инструментом. Подход на основе использования эквидистантных траекторий позволяет упрощённо представить поверхность как набор двумерных сечений профиля ошибки и производить расчёт управляющего воздействия независимо в каждом сечении. При этом инструмент по аналогии с понятиями теории управления представляется как аperiodическое звено, на вход которого поступает сигнал «скорость инструмента», и формирующее сигнал «величина съёма» на выходе. Показано, что для вычисления необходимого входного сигнала можно избежать использования операции деконволюции, заменив её пропорциональным управлением в сочетании с итерационным пересчётом по модели результата обработки. Далее проанализировано влияние шага эквидистантных траекторий на величину остаточной волнистости. Приведены примеры обработанных асферических поверхностей.

Ключевые слова: автоматизированное формообразование, малоразмерный инструмент, асферическая оптика, остаточная волнистость, управляющая программа.

Коды OCIS: 220.4610, 220.5450, 220.1250.

В данной статье излагается способ расчёта управляющей программы для станков, предназначенных для исправления формы оптических поверхностей методом субапертурного (малоразмерного) инструмента. Суть этого метода в том, что исправление неровностей поверхности производится с помощью какого-либо воздействия на поверхность с контролируемой скоростью съёма, например, полировки или шлифовки свободным абразивом, шлифовки алмазным инструментом, ионной полировки и т.д. При этом зона обработки в каждый момент времени имеет фиксированный размер, значительно меньший, чем размер обрабатываемой детали, и может по ней свободно перемещаться под управлением компьютера. Согласно формуле Престона, величина съёма в каждой точке обрабатываемой поверхности пропорциональна времени пребывания инструмента в этой точке. Такой подход, традиционно используемый для фи-

ниширования сверхточных поверхностей, позволяет, в отличие от характерной для механообработки работы в жёстких осях, достигать точности обработки, ограниченной лишь точностью контроля и на порядки выше точности самого станка. В СССР первыми серийными станками, предназначенными для ретуши малоразмерным инструментом, стали станки серии АД (автоматизированные доводочные), спроектированные НПО «Оптика». Станки снабжались стойкой ЧПУ Луч-43М, но не комплектовались какой-либо программной системой для подготовки управляющих программ. По сути, те же станки — серии «АПД» — с модернизированными системой числового программного управления и доработанной механикой представлялись НПО «Оптика» в 2000–2010 годах. За рубежом наибольшую известность получили разработанные в 2000 годах фирмами Zeeko, Optotech, QED системы IRP, MCP, Q22/Q-flex соответственно.

В упомянутых станках, кроме традиционного малоразмерного инструмента, реализованы фирменные способы полировки — мембранный (bonnet) и струйный (FJP) инструменты у Zeeko, магнито-реологический (MRF) у QED, струйно-напорный (A-FJP), мембранный (FEM) и шаровой (A-WRT) у Optotech [8]. Можно также упомянуть ряд станков, в которых используется метод ионной и плазменной [6–9] ретуши. Для всех вышеупомянутых способов обработки, общим для которых является наличие перемещаемой по обрабатываемой поверхности зоны обработки с постоянным или управляемым распределением съёма, можно применить универсальные алгоритмы расчёта коррекции. Поэтому в данной статье достаточно ограничиться рассмотрением применяемого в станках серии АД традиционного малоразмерного инструмента, кинематика которого соответствует представленной на рис. 1. Инструмент может вращаться вокруг своей оси, одновременно осциллируя вокруг оси планетарного вращения, либо совершать только одно из этих движений. При этом со временем под инструментом образуется углубление, показанное на рис. 2. Форма этого углубления, которую мы называем «статическим профилем съёма» зависит от соотношения скоростей вращательного и осциллирующего движений, диаметра инструмента и радиуса осцилляции. Чем дольше работает инструмент, находясь на месте, тем глубже становится лунка. Для обработки оптической поверхности центр осциллирующего движения пе-

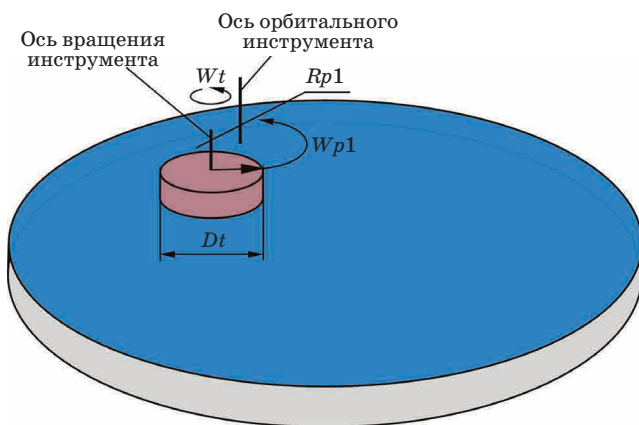


Рис. 1. Кинематика малоразмерного инструмента.

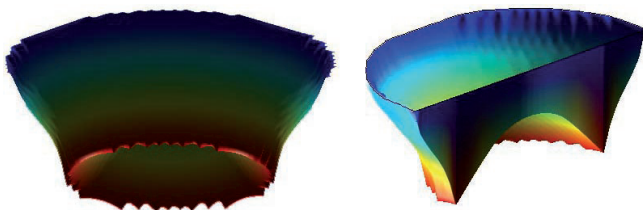


Рис. 2. Статический профиль съёма.

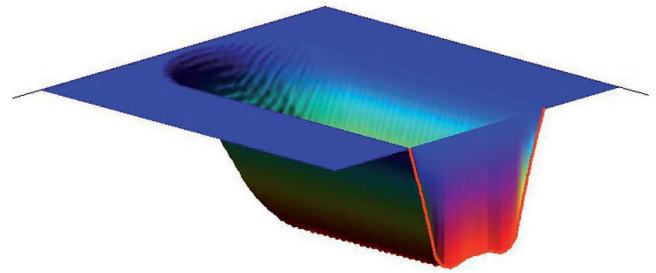


Рис. 3. Динамический профиль съёма.

ремещается. При этом на этой поверхности остаётся канавка, как показано на рис. 3. Форму сечения этой канавки перпендикулярно направлению движения мы называем динамическим профилем съёма. Чем медленнее перемещается инструмент, тем глубже канавка. Задача расчёта управляющей программы состоит в том, чтобы выбрать траекторию и скорости перемещения центра съёма таким образом, чтобы максимально улучшить поверхность после обработки. В принципе, при этом можно также управлять и скоростью осцилляции или вращения и усилием прижима, но как правило, их не используют для этих целей, а фиксируют на постоянном уровне на протяжении всего сеанса обработки. Некоторое обоснование такого выбора приведено в [5].

Для формирования траектории различные системы используют по крайней мере два подхода.

Первый из них подробно описан в ряде статей [2–4], патентах тех же авторов и в работе [5]. В качестве управляющего параметра используется время пребывания инструмента в каждом из узлов рабочей сетки. На топограмме ошибок поверхности формируется сетка (в частном случае), инструмент (в нашей терминологии — статический профиль съёма) также разбивается на участки, аналогичные по размеру участкам на топограмме. Расчёт времени пребывания проводится с использованием оптимизационной процедуры. Выбор траектории при этом производится таким образом, чтобы пройти каждый узел с ненулевым временем пребывания, обеспечив нахождение инструмента в нём в течение рассчитанного времени.

Другие системы, в том числе и система, описываемая здесь, используют упорядоченные траектории типа спирали Архимеда, концентрических дуг, растра или других равноотстоящих линий. На рис. 4 приведён пример растровой траектории. Каждую такую линию траектории мы называем зоной обработки. В этом случае подготовка управляющей программы производится в 3 этапа:

1. Выбор инструмента и абразивного состава, задание постоянных параметров обработки (скорость вращения инструмента, радиус осцилляции, усилие прижима), расчёт статического и динамического профилей съёма.

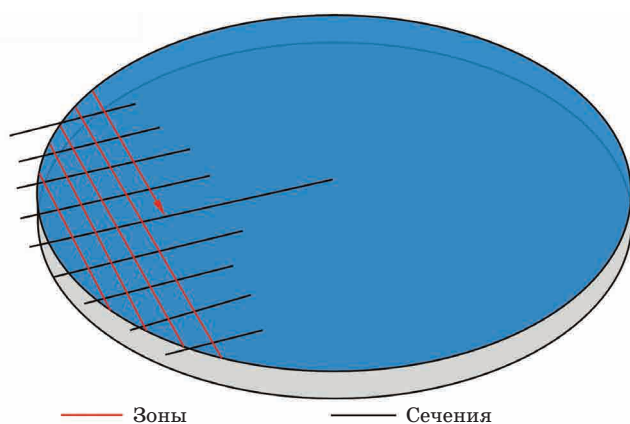


Рис. 4. Траектории типа раstra и перпендикулярные им сечения.

2. Выбор формы траекторий, выбор параметров траекторий (расстояние между линиями, шаг расчёта по линии).

3. Расчёт скоростей перемещения на каждом участке траектории для минимизации остаточной ошибки обработки и выдача управляющей программы в G-кодах устройства числового программного управления.

Выбор инструмента и связанных с его работой параметров зависит от множества факторов и заслуживает отдельного рассмотрения. В данной статье остановимся на втором и третьем этапах подготовки управляющей программы.

Выбор типа траекторий обуславливается, во-первых, формой обрабатываемой апертуры, а во-вторых, поставленной для цикла обработки задачей. Например, для круглых апертур с центральной неиспользуемой областью подходит набор концентрических окружностей и спираль Архимеда. Для всех форм зрачка подходит растровая обработка, для обработки краевой зоны нужны траектории, геометрически подобные контуру элемента. Важным параметром, влияющим на результат обработки, является расстояние между зонами. Выбор этого параметра видится как компромисс между качеством и производительностью цикла обработки — сокращение расстояния уменьшает остаточную волнистость, но увеличивает время «холостого пробега», поскольку скорость перемещения инструмента нельзя поднимать выше некоторого предела. В то же время вычислительные эксперименты показали, что выбор расстояния между зонами лучше производить из некоторого ряда оптимальных значений, дающими локальные минимумы остаточной волнистости. На рис. 5 приведена форма зависимости относительной амплитуды волнистости $PV_{\text{ripple}}/PV_{\text{drem}}$ от межзонного расстояния R_z для приведённого на рис. 3 динамического профиля съёма. Обе величины нормированы относительно глубины PV_{drem} и ширины W_{drem}

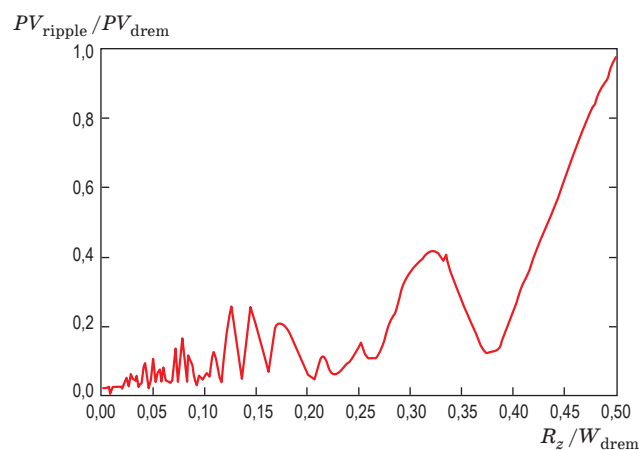


Рис. 5. Расчётная зависимость размаха PV_{ripple} остаточной волнистости от расстояния R_z между зонами нормированных относительно глубины PV_{drem} и ширины W_{drem} профиля съёма.

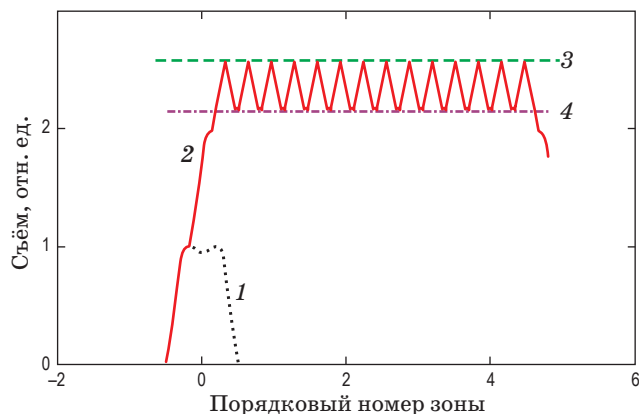


Рис. 6. Расчётная форма суммарного съёма при расстоянии между зонами 0,32 ширины прохода. 1 — динамический профиль съёма, 2 — суммарный съём, 3, 4 — максимальное и минимальное значения волнистости.

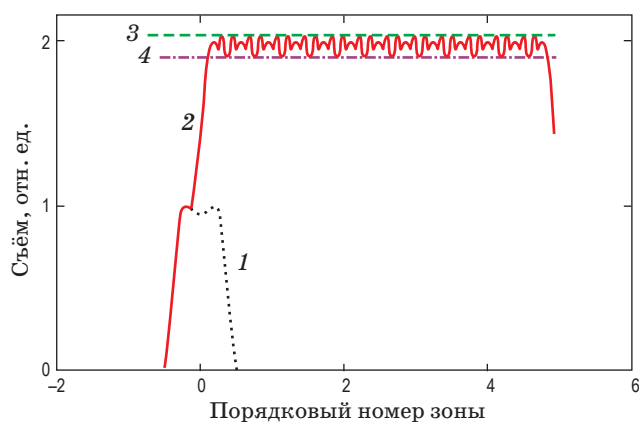


Рис. 7. Расчётная форма суммарного съёма при расстоянии между зонами 0,38 ширины прохода. 1 — динамический профиль съёма, 2 — суммарный съём, 3, 4 — максимальное и минимальное значения волнистости.

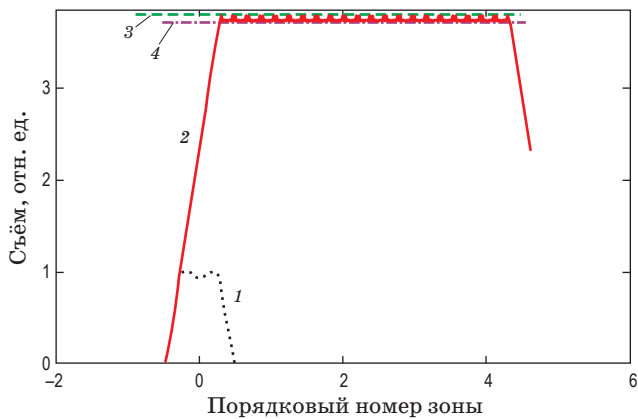


Рис. 8. Расчётная форма суммарного съёма при расстоянии между зонами 0,2 ширины прохода. 1 — динамический профиль съёма, 2 — суммарный съём, 3, 4 — максимальное и минимальные значения волнистости.

динамического съёма соответственно. На следующих рис. 6–8 приведены примеры модели волнистости для того же профиля съёма при выборе межзонного расстояния 0,32 (рис. 6), 0,38 (рис. 7) и 0,2 (рис. 8) ширины прохода. Здесь видно, что, несмотря на увеличение расстояния между зонами во втором случае, волнистость резко сокращается. Результат соответствует приведённой на рис. 5 закономерности, полученной путём многократного моделирования остаточной волнистости для различных значений межзонного расстояния.

Выбрав форму траекторий и расстояние между траекторными линиями (зонами) следует разбить зоны на участки, как показано на рис. 4, и рассчитать скорости на каждом участке каждой зоны. Выбрав для расчёта подходящий набор сечений, мы получим некоторую сетку, составляемую зонами и сечениями — радиальную или ортогональную, в зависимости от вида траекторий. Пренебрегая зависимостью съёма на смежных участках (частях зоны между сечениями) от изменения скорости, можно заменить вычислительно громоздкую общую оптимизационную процедуру последовательностью расчётов на отдельных сечениях. Но и такая упрощённая задача не поддаётся решению в общем аналитическом виде и требуется выбрать подход — оптимизационный либо итерационный. Ещё раз посмотрим на рис. 8. Здесь наблюдается кривая, начинающаяся с разгона, затем торможение и выход на постоянную (если пренебречь остаточной волнистостью) полку. Эта кривая напоминает известную в теории управления переходную характеристику (форму реакции на ступенчатое воздействие) апериодического звена, правда, ещё и с физически нереализуемым во временной области опережением. Направление сечения будет соответствовать «времени», ампли-

туда каждого из профилей — величине «входного сигнала», результирующий съём — «выходному сигналу». Отношение величины этой полки к амплитуде одного профиля съёма соответствует коэффициенту усиления K звена, угол наклона определяет «постоянную времени» T . Его передаточная функция приведена ниже

$$H(s) = K \exp(\tau s) / (1 + Ts) \quad (1)$$

Пользуясь этой аналогией, можно сказать, что решение задачи нахождения амплитуд профиля съёма R для каждой зоны сводится к определению формы воздействия, подаваемого на «апериодическое звено» — инструмент, для получения «реакции», близкой к исходной ошибке E в сечении

$$R(s) = 1/K(1 + Ts) \exp(-\tau s) E(s) \quad (2)$$

Такой расчёт несложно реализовать в виде программы, а можно ещё упростить, пренебрегая дифференцированием и задержкой, получив простой пропорциональный закон

$$R_{i,j} = E_{i,j}/K, \quad (3)$$

где $R_{i,j}$ — амплитуда динамического профиля в сечении i зоны j , $E_{i,j}$ — исходная ошибка поверхности в сечении i зоны j .

Для улучшения результата работы алгоритма вместо мгновенных значений $E_{i,j}$ лучше использовать значения ошибки, средневзвешенные по смежным зонам с весовой функцией, повторяющей динамический профиль съёма.

Далее, соответствующие амплитудам съёма скорости перемещения инструмента для каждой из зон рассчитываются по формуле

$$V_{i,j} = TK_{\text{dyn}} / (R_{i,j} + R_{\text{min}}), \quad (4)$$

где TK_{dyn} — динамический коэффициент съёма, $R_{\text{min}} = TK_{\text{dyn}}/V_{\text{max}}$ — амплитуда съёма при движении с максимальной скоростью.

Для дальнейшего улучшения результатов проводится моделирование результатов обработки и расчёт корректирующих значений амплитуд профиля съёма, которые добавляются к полученным на первом шаге итерации значениям. Процедура повторяется до тех пор, пока наблюдается сокращение моделируемой остаточной ошибки. Такой подход приводит к существенному вычислительному упрощению задачи в сравнении с математически строгим, подробно описанным в [9], ценность которого тем не менее в значительной мере нивелируется нестабильностью параметров процесса полировки.

Преимуществом данного метода является исключительно высокая скорость расчёта (единицы секунд для сетки в десятки тысяч точек на обычном современном персональном компьютере) при хорошем качестве работы. Как показала многолетняя практика применения метода, расчётное



Рис. 9. Интерференграмма внеосевого параболического зеркала с диаметром 200 мм.

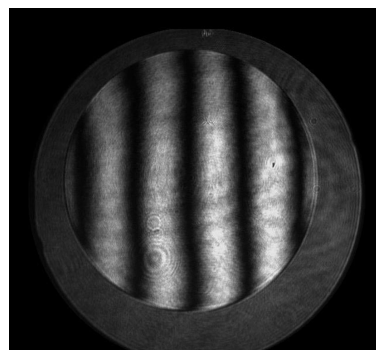


Рис. 11. Интерференграмма асферической линзы с диаметром 160 мм.

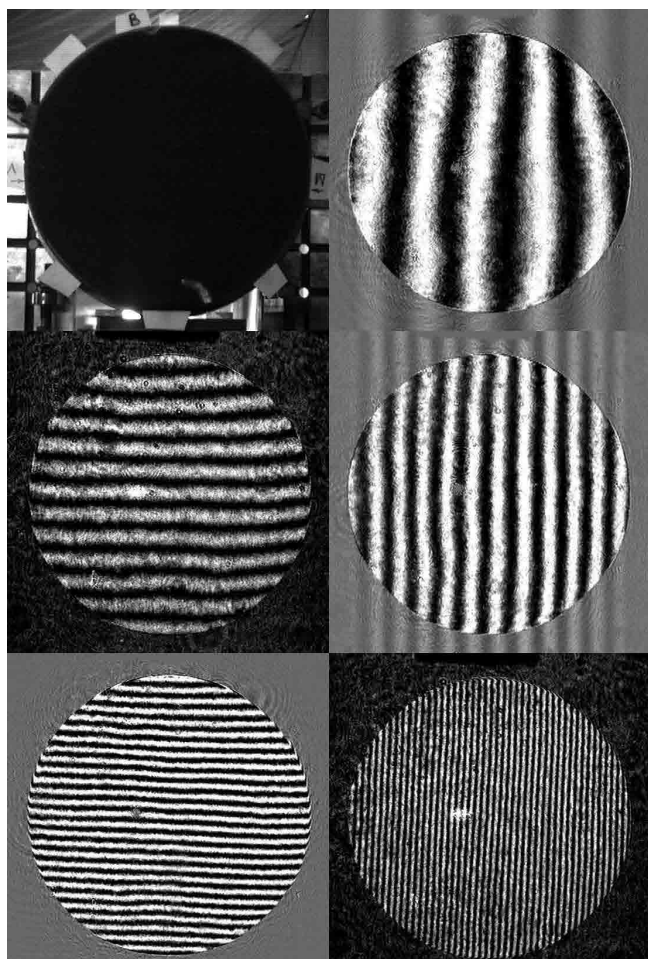


Рис. 10. Интерференграмма внеосевого параболического зеркала с диаметром 350 мм.

сокращение остаточной ошибки (за исключением высокочастотной волнистости и краевых эффектов) ограничивается только наличием в её про-

странственном спектре частот выше «частоты среза» профиля съёма.

С использованием данного метода расчёта в НИИ ОЭП произведены множество партий различных асферических оптических элементов. На рис. 9–11 приведены примеры интерференграмм асферических оптических поверхностей, полученных после обработки на станках типа АД с применением описанного способа, начиная с асферизации от ближайшей сферы. Как видно из них, удаётся получить достаточно ровную и гладкую поверхность, несмотря на значительную асферичность и её градиент. Например, внеосевой параболоид со световым диаметром 200 мм с фокусом 250 мм, внеосевым смещением 120 мм имеет асферичность порядка 500 мкм, а градиент асферичности на краю достигает 20 мкм на миллиметр. Достигнута точность поверхности — менее 0,06 мкм по размаху и 0,008 мкм по среднеквадратической ошибке (СКО), из которых половину вклада даёт ошибка типа комы и зональная, обусловленные деформацией зеркала при окончательном круглении, что связано с качеством стекла и технологией кругления, а не с погрешностью формообразования. Интерференграмма приведена на рис. 9. На рис. 10, 11 представлены интерференграммы внеосевого параболоида со световым диаметром 350 мм, асферической линзы для голографии со световым диаметром 160 мм, достигнутая точность поверхности на этих элементах также порядка 0,06 мкм по размаху.

Автор выражает благодарность и глубокую признательность своим коллегам, участвовавшим в разработке, реализации и апробировании описанного метода, Чудакову Ю.И., Михайлову В.В., Чухнину А.Я. из НИИ ОЭП; Бурсикову В.А., Пушкареву А.М., Чередниченко А.И. из СПБЭТУ (бывш. ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина)).

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник технолога-оптика / Под ред. Окатова М.А., Антонова Э.А., Байгожина А. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.
2. Лямин Ю.Б., Рябинин В.А. Автоматизированные доводочные станки модели АД // ОМП. 1987. № 7. С. 31–33.

3. Семенов А.П., Савельев А.С. Расчёт траектории движения малого инструмента при автоматизированном формообразовании поверхностей оптических деталей // Оптический журнал. 1994. № 6. С. 21–24.
4. Семенов А.П., Савельев А.С. Программа управления формообразованием поверхностей крупногабаритных оптических деталей // Оптический журнал. 1995. № 9. С. 62–65.
5. Абдулкадыров М.А. Автоматизированная система формообразования асферических крупногабаритных оптических деталей // Автореферат канд. дисс. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 190 с.
6. Богданов А.П., Бунин И.Г. Доводка формы оптической поверхности ионным пучком малого сечения, управляемым программированным перемещением // ОМП. 1988. № 2. С. 39–42.
7. Богданов А.П., Душкин В.А., Михайлова А.Н. и др. Ионно-лучевое формообразование прецизионных оптических поверхностей программно позиционируемым ионным пучком малого диаметра // Оптический журнал. 1994. № 6. С. 55–59.
8. Braunecker B. (Bernhard). Advanced optics using aspherical elements / Ed. by Braunecker B., Hentschel R., Tiziani H. Washington, USA: SPIE, 2008. 414 p.
9. Shengyi Li, Yifan Dai. Large and middle-scale aperture aspheric surfaces: lapping, polishing and measurement. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2015. 620 p.