

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ»

На правах рукописи

**ТАБАЧКОВ Алексей Геннадьевич**

**КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УНИФИКАЦИЯ  
МИКРООБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ АВТОМАТИЗАЦИИ ИХ  
СБОРКИ**

Специальность: 05.11.14 – Технология приборостроения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Санкт-Петербург  
2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО) на кафедре Компьютеризации и проектирования оптических приборов (КиПОП).

Научный  
руководитель:

Доктор технических наук  
профессор Латыев С.М.

Официальные  
оппоненты:

Доктор технических наук  
профессор Валетов ВА  
Доктор технических наук  
профессор Натаровский С.Н.

Ведущая  
организация:

НПК ГОИ им. С.И. Вавилова

Защита состоится 28 июня 2011г. в 13:00 в аудитории 461 на заседании диссертационного совета Д.212.227.04 в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО) по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр. 49

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО)

Автореферат разослан 26 мая 2011г.

Отзывы и замечания по автореферату (в 2экз.), заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр. д.49, СПбГУ ИТМО, секретарю диссертационного совета Д.212.227.04

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д.212.227.04  
Кандидат тех.наук, доцент

\_\_\_\_\_ Киселев С.С.

## **Общая характеристика работы**

### **1. Актуальность темы**

В настоящее время большинство западных и отечественных фирм, производящих оптическую технику проводят исследования и работы по автоматизации сборки оптических узлов и функциональных устройств. Автоматизация их сборки является весьма актуальной и обусловлена не только стремлением повысить производительность труда и качество сборки, но также и тем, что её выполняют высококвалифицированные сборщики-механики, в которых предприятия всегда испытывают острый дефицит. Естественно, что в первую очередь пытаются автоматизировать сборку изделий, изготавливаемых большими сериями. К таким изделиям относятся, в частности, линзовые микрообъективы (МО). Автоматизация их сборки затруднена тем, что они должны создавать изображение высокого качества, соответствующее дифракционному пределу разрешения, поэтому требования к точности изготовления и сборки их компонентов зачастую превосходят технологические возможности оборудования. В связи с этим, процесс сборки МО, как правило, не обходится без трудоемких юстировочных операций, автоматизация которых весьма проблематична и требует проведения специальных научных исследований для разработки методов и средств для её осуществления. Кроме этого, создание автоматизированных линий сборки МО невозможно без проведения работ по унификации их конструкций, технологич. оснастки и адаптации к условиям автоматизиров. сборки, юстировки и контроля.

### **2. Цель и задачи работы**

Целью настоящей работы является конструкторско-технологическая унификация микрообъективов с учетом автоматизации их сборки. Для достижения указанной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- провести анализ существующих конструкций и технологий сборки МО;
- определить целевые показатели качества и основные унифицируемые конструктивные параметры МО;
- разработать базовую конструкцию и модифицир. ряд унифициров. МО;
- разработать методику расчета и рассчитать допуски на технологические погрешности унифицированных конструкций, определяющие целевые показатели качества МО;
- провести экспериментальные исследования опытных образцов унифицированных МО;
- разработать концепцию автоматизированной линии сборки МО;
- определить оптимальные технологические процессы и схемы сборки, юстировки и контроля МО.

### **3. Научная новизна и практическая значимость работы**

Научная новизна работы заключается в том, что впервые создана базовая унифицированная модель конструкции линзового МО, а также разработана и обоснована концепция автоматизированной линии сборки унифицированных МО на основе адаптивной селекции их компонентов.

Практическая значимость работы:

- разработан унифицированный ряд из 6-ти линзовых МО, позволяющий получить порядка 370 различных модификаций из ограниченного числа типоразмеров деталей;

- уменьшены временные затраты на разработку конструкций МО и технологической оснастки;
- существенно улучшена технологичность МО благодаря уменьшению количества оригинальных деталей, использованию групповой технологии их изготовления, уменьшению кол-ва оснастки и мерительного инструмента;
- разработана методика и рассчитаны допуски на технологические погрешности МО, влияющие на целевые показатели качества МО;
- определен состав и требования к стандам автоматизированной линии сборки МО;
- предложена модель логистики работы линии сборки;
- разработаны методы сборки и юстировки унифицированных МО;
- разработаны функциональные схемы стандов для автоматизированного контроля целевых характеристик МО в процессе их сборки;
- изготовлены и исследованы опытные экземпляры унифицированных МО, послужившие прототипами ряда серийно выпускаемых промышленностью микрообъективов.

#### **4. Апробация работы**

Результаты работы докладывались на 15 всероссийских и международных конференциях:

1. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium «IWK-50»  
Германия Ilmenau 2005
2. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium «IWK-51»  
Германия Ilmenau 2006
3. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium «IWK-53»  
Германия Ilmenau 2008
4. V International Conference Optics-Photonics Design & Fabrication«ODF-06»  
Япония Nara 2005
5. V международный оптический конгресс «Оптика– XXI век»  
Россия СПб 2008
6. VI международный оптический конгресс «Оптика– XXI век»  
Россия СПб 2010
7. VII Международная конференция «Прикладная оптика-2008»  
Россия СПб 2008
8. IX Международная конференция «Прикладная оптика-2010»  
Россия СПб 2010
9. XXXIX научно-методическая конференция СПбГУ ИТМО  
Россия СПб 2010
10. Interner Workshop «Flexidle Montage»  
Германия Ilmenau 2005
11. Interner Workshop «Flexidle Montage»  
Германия Ilmenau 2007
12. Interner Workshop «Flexidle Montage»  
Германия Ilmenau 2008
13. Interner Workshop «Flexidle Montage»  
Германия Ilmenau 2009
14. Interner Workshop «Flexidle Montage»  
Германия Ilmenau 2010
15. International Conference Optical Fabrication«Optifab-2011»  
Северная Америка New York 2011

## **5. Публикации**

По теме диссертации опубликовано 21 работа, из которых 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, и 11 патентов РФ на изобретения и полезные модели.

## **6. Основные положения, выносимые на защиту**

1. Унифицированная базовая модель конструкции МО, разработанная с учетом автоматизации сборки и юстировки;
2. Унифицированная линейка конструкций МО, позволяющая повысить технологичность МО;
3. Концепция линии автоматизированной сборки МО на основе адаптивной селекции их компонентов;
4. Модель логистики работы и состав стандов линии сборки;
5. Методы сборки и юстировки унифицированных МО;
6. Методика расчета допусков на технологические погрешности унифицированных МО;
7. Схемы стандов для контроля целевых характеристик МО;
8. Результаты внедрения работы в практику производства МО.

## **9. Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, 3 приложений и списка использованной литературы, включающего 250 источника. Работа изложена на 155 страницах, в том числе содержит 115 рисунков и 11 таблиц.

## **Краткое содержание работы**

**В первой главе** проанализировано состояние вопроса и определена постановка задач на исследование; дана классификация микрообъективов, определены целевые показатели качества; рассмотрены существующие типовые конструкции, технологические процессы сборки микрообъективов; проанализированы технологические погрешности изготовления и сборки узлов микрообъективов, существующие проблемы, методы и средства контроля целевых показателей качества. Сделан вывод о необходимости разработки базовой унифицированной модели и параметрических рядов конструкций микрообъективов с учетом автоматизации технологических процессов их сборки.

**Во второй главе** изложен процесс разработки унифицированной базовой конструкции линзового МО и модифицированных рядов. На ее основе рассчитаны показатели унификации конструкции линейки из шести модификаций, охватывающих более 370 различных микрообъективов.

Одним из важнейших условий, обеспечивающих успешное проведение работ по стандартизации, является решение вопросов конструкторской и технологической унификации и нормализации деталей и технологических процессов. Совершенствование конструкции и организационной структуры позволяет сократить номенклатуру деталей, оснастки и число сборочных операций, необходимых для сборки изделий. Отбор и ограничение параметрических рядов приводит к технически и экономически обоснованной

номенклатуре, что позволяет организовать производство с минимальными затратами труда.

Для количественной оценки применялись такие показатели как:

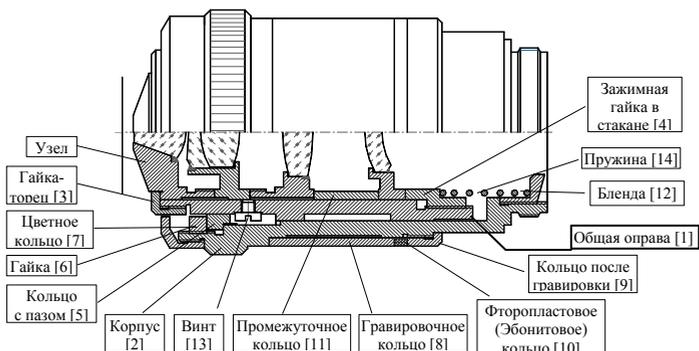
$T_{и} = \sum_{i=1}^k T_i$	трудоемкость изготовления изделия (абсолютный показатель); где $T_i$ -трудоемкость изготовл. и испытания $i$ -й части изделия
$K_{y.т} = T_{и} / T_{б.п}$	уровень технологичности конструкции по трудоемкости изготовления (относительные показатели); где $T_{б.п}$ -базовый показатель трудоемкости изготовления типового изделия
$C_{т} = C_{м} + C_{з} + C_{ц.р}$	технологическая себестоимость изделия(абсолютный показат.); где $C_{м}$ , $C_{з}$ и $C_{ц.р}$ -соответственно суммарные затраты на материалы, заработную плату и цеховые расходы
$K_{y.с} = C_{т} / C_{б.т}$	уровень технологичности конструкции по себестоимости (относительный показатель); где $C_{т}$ -достигнутая технологическая себест-сть изделия, $C_{б.т}$ -базовый показатель технологической себест-ти типового изделия
$K_{пр} = \frac{n - n_0}{n} 100\%$	коэффициентами применяемости; где $n_0$ -кол-во типоразмеров оригинальных составных частей $n$ -общее количество типоразмеров составных частей

Существует несколько методов унификации – *Индивидуальный, Базовый, Агрегатно-модульный*. В практике точного приборостроения, при создании конструкций приборов чаще всего используется смешанный метод унификации, включающий в себя элементы индивидуального, базового и агрегатно-модульного методов. При создании линейки унифицированных МО применялся базовый метод с элементами индивидуального метода, учитывающего специфику оптических компонентов микробиообъективов

При создании унифицированной базовой конструкции линзового МО и модифицированных её рядов была осуществлена унификация следующих **ОСНОВНЫХ** конструктивных параметров, характеристик и свойств:

- МО имеет бесконечную длину тубуса и независимую абберационную коррекцию;
- высота объектива должна быть равна 45мм в соответствие со стандартом DIN или 33мм – по стандарту RMS;
- значения собственных фокусных расстояний МО рассчитывается исходя из использования в микроскопе дополнительной тубусной линзы (системы) с фокусным расстоянием  $F' = 160\text{мм}$ ;
- значения линейных увеличений МО соответствует ряду, изменяющемуся по геометрической прогрессии со знаменателем 1,6;
- присоединительная резьба МО к револьверному устройству микроскопа имеет значение 0,8";
- конструктивное решение «механической» части сухих и иммерсионных микробиообъективов, по возможности, должно быть одинаковым;
- унифицированная конструкция МО должна иметь возможность адаптации к различным условиям работы микроскопа.

На основе анализа большого многообразия существующих конструкций МО, с учетом вышеперечисленных задач унификации, была разработана структура и конфигурация (модель) базовой конструкции МО (Рис. 1). Отличительной особенностью этой конструкции является то, что все оправы оптических элементов устанавливаются в общую оправу (стакан), открытого типа, которая может перемещаться и разворачиваться в корпусе.



**Рис. 1** Модель конструкции базового микрообъектива

Базовая конструкция содержит большое количество деталей, которые могут быть одинаковыми в различных её модификациях. Данное обстоятельство позволило уменьшить номенклатуру оригинальных деталей и создать оптимальную линейку из 6-ти модифицированных рядов, каждый из которых содержит большое количество унифицированных конструкций и деталей. В Табл. 1 представлены результаты унификации «механической» части конструкции МО различных оптических схем и характеристик.

**Табл. 1** Применяемость деталей в конструкции МО различных оптических расчетов

Шифр объектива	№	Стак.	корпус	кольцо л/прав	фтор. кольцо	эбонит. кольцо	промеж. кольцо	гравир. кольцо	винт	кольцо с пазом	цветное кольцо	гайка	гайка торца	зажим. гайка	пружина	бленда	палец	диаметр в сборе
		∅	1	2	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16
ОСХ-40-0 (0.17) 40/0.65 (б/и)	1	1	1	1	1	—	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	—	—
ШЛ-ОПА-100Б-0 100/0.95	2	2	2	2	—	—	2	2	1	2	2	2	2	2	1	1	—	—
ОСХ-100-0-1 100/1.25 ми (б/и)	3	3	3	2	—	3	3	3	1	3	3	3	3	3	1	1	—	—
ОФ-40Л-0 40/0.85	4	4	4	3	4	—	4	4	1	4	4	4	4	4	4	4	—	—
ОФ-20Л-0 20/0.70	7	4	4	4	4	—	—	4	1	4	4*	4	4	4*	—	7	—	—
ОФ-100-0-1 100/1.30 ми (б/и)	8	3	3	3	—	3	3	3	1	3	3	3	3	3	1	1	—	—
ОФ-100Л-0-1-И 100/1.30 ми (ир)	9	3*	3*	3	—	3	—	3	1	3	3	3	3	3	1	1	8	8
ОФ-100Л-0-2 100/1.20 ви (б/и)	10	3	3	3	1	—	3	3	1	3	3	3	3	3	1	1	—	—
ОСХ-10-0 10/0.25 (б/и)	11	4**	4**	2	2	—	—	2	—	—	11	11	4	1	—	7	—	—
ОСХ-20Б-0 (d=0) 20/0.45 (б/и)	12	4	4	4	4	—	4**	4	1	4	4*	4	4	4	1	14	—	—
ОСХ-20Б-0-И (d=0) 20/0.45 (ирис)	13	4*	4*	4	4	13	—	13	1	4	4*	4	4	4	1	13	3	17
ОСХ-20-0 (0.17) 20/0.45 (б/и)	14	4	4	4	4	—	4**	4	1	4	4*	4	4	4	1	14	—	—
ОСХ-20-0-И (0.17) 20/0.45 (ирис)	15	4*	4*	4	4	15	—	15	1	4	4*	4	4	4	1	12	3	15
ОСХ-40ЛБ-0-2 40/0.75 ви	16	1	1	1	1	16	1	1	1	1	1	1	1	1	—	1	—	—
ОСХ-40Б-0 (d=0) 40/0.65 (б/и)	17	1	1	1	1	—	1**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	—	—
ОСХ-40-0 (0.5) 40/0.65 (б/и)	18	1	1	1	1	—	1**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	—	—
ОСХ-100-0-1И 100/1.25 ми (ир)	19	3*	3*	3	—	3	—	3	1	3	3	3	3	3	1	3	11*	9

Принятые обозначения:

- 4. -- Деталь применяется в первый раз
  - 4 -- Деталь заимствуется
  - 4\* -- Деталь заимствуется с незначительной доработкой
  - 4\*\* -- Деталь подобная по размерам, но отличная по габариту
  - 4 [13] -- Применяются две детали (новая деталь и деталь из комплекта 1 - 4)
- Для сокращения размеров таблицы, приведены данные относительно четырех базовых объективов (базовая линейка состоит из шести МО: 1- Ø13, 2- Ø14, 3- Ø15, 4- Ø16, 5- Ø17, 6- Ø18).
- Во второй части таблицы приведен не полный перечень унифицированных МО.

Так как унифицированные микрообъективы должны использоваться в микроскопах при различных условиях работы, предусмотрены варианты их адаптации к этим условиям (см. Рис. 2). Другим аспектом адаптации является использование унифицированной конструкции микрообъектива в микроскопах с различной длиной тубуса (Рис. 3).



**Рис. 2** Адаптация унифицированной конструкции к различным условиям наблюдения



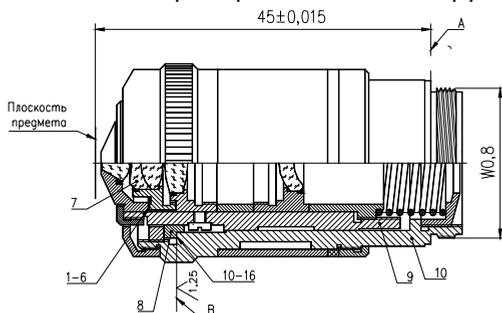
**Рис. 3** Адаптация унифицированной конструкции к различным параметрам тубуса

Благодаря базовому методу унификации конструкций микрообъективов удалось получить достаточно большое количество различных их вариантов из ограниченного числа типоразмеров деталей. Это существенно повышает технологические показатели изделия не только благодаря уменьшению количества оригинальных деталей, но путём использования групповой технологии их производства, уменьшения кол-ва мерительного инструмента и оснастки, сокращением времени разработки и проектирования (Табл. 2).

**Табл. 2** Техничко-экономические показатели унификации

Перечень показателей	«Старая» конструкция	«Новая» конструкция	
	Средн. значение для каждого МО (650шт)	Модифиц. ряды МО (6шт)	Внутриряд.униф. МО (370шт)
Кол-во оригинальных деталей	100%	90%	10% - 1%
Кпр (изделия) [коэф. применяемости]	1%	12%	64% - 100%
Кпр (техн. оснастки) [коэф. применяемости]	1%	12%	90% - 100%
Временные затраты на разработку конструкции	100%	120%	30% - 20%
Временные затраты на разработку техн. оснастки	100%	80%	20% - 5%

Для повышения производительности сборки в конструкции была предусмотрена возможность автоматизации процессов сборки и юстировки. Рассмотрим эти возможности на примере базовой конструкции (Рис. 4).



**Рис. 4** Фрагмент сборочного чертежа базового микрообъектива

Крепление линз в оправе осуществляется методом вклеивания, имеющего ряд преимуществ перед завальцовкой. Он обладает большей возможностью повышения производительности, особенно с появлением ф/п-клеев (под действием УФ-излучения фотополимеризующихся в течение 10-15сек.) и автоматизированных вклеивающих станций с возможностью центрировки оптических компонентов. Сборка внутренних узлов в общую оправу может осуществляться как вручную, так и роботом с передней или задней части. Для компенсации влияния децентрировок компонентов на aberrации при неавтоматизированной сборке предусмотрен радиальный сдвиг узла. При автоматизированной сборке узлы устанавливаются роботом с разворотом на определенные углы, значения которых рассчитывают по математическим моделям виртуальной сборки. Для компенсации сферической aberrации МО предусмотрено прокладное кольцо (1-6), толщину которого рассчитывают и подбирают заранее на основе результатов виртуальной сборки. Высота МО обеспечивается установкой дистанционного кольца (10-16) (которое также выбирается на основании виртуальной сборки), «центровка» объектива достигается разворотом всего стакана с узлами.

**Третья глава** посвящена концепции линии автоматизированной сборки унифицированных микрообъективов на основе адаптивной селекции их компонентов. Разработана структурная схема автоматизированной линии и изложена логистика ее работы. Разработаны функциональные схемы стендов контроля целевых показателей качества. Представлена методика работы и состав стендов автоматизированной линии сборки и контроля.

Любая производственная линия должна обладать свойствами пропорциональности, параллельности, прямооточности, непрерывности и ритмичности. Смена оснастки и инструмента должна выполняться простыми движениями и фиксироваться специальными зажимами. Время переналадки не должна превышать 15 мин.

Создание линии сборки базируется на использовании современного оборудования с программным управлением и передовых технологий для гибкой сборки оптических и оптико-механических узлов и изделий. Для создания автономного комплекса, отвечающего требованиям законченного производства, его структуру необходимо разбить на три блока (Рис. 5)



Рис. 5 Структура лаборатории сборки

### Компоненты вспомогательного производства

Данное подразделение не участвует на прямую в производственном процессе сборки изделия на линии. Его основная цель обеспечение нормальной и непрерывной работы основного производства.

В структуру данного подразделения входят службы, отвечающие за работоспособность всех установок основного производства, их отладку и переналадку. Складская система в данном производстве является наиболее крупным и важным компонентом.

### Компоненты научного центра

Первое подразделение, входящее в научный центр, компьютерный отдел. В данном подразделении расположен центральный компьютерный сервер, обеспечивающий управление ритмичной работой компьютеров, находящихся в пределах комплекса, тем самым обеспечивается слаженная, спланированная работа агрегатов, устройств и механизмов.

Второе подразделение обеспечивает технического сопровождения производства, анализ и устранение технических сбоев в работе комплекса.

### Компоненты основного производства

Зона основного производства рассчитана на проведение полного цикла работ по сборке изделия. В данной зоне производится сборка, юстировка и аттестация объективов и их составных компонентов.

Основными составляющими производства являются:

Транспортная линия. На сборочной линии транспортные потоки предполагается реализовать при помощи системы Montrac фирмы Montech AG (Рис. 6), которая оснащена самоуправляемыми шатлами (Рис. 7).



Рис. 6 Система Montrac



Рис. 7 Шатлы

Рабочие станции представляют собой рабочие площадки, выполняющие определенные операции в технологической цепочке. Они оборудуются специальным оборудованием и агрегатами (Рис. 8).



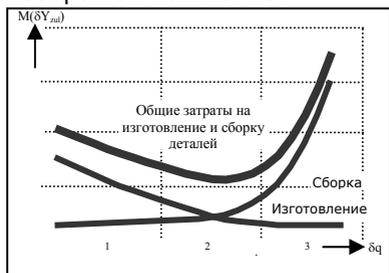
а) установка вклейки и центрировки      б) установка измерений      в) сборочный робот

**Рис. 8** Разновидность оборудования на станциях

### Автоматизация производства на основе ASM

Сборка микрообъективов является процессом, плохо поддающимся автоматизации. Одним из путей повышения производительности труда при сборке с одновременным обеспечением требуемого качества может быть использование метода адаптивно-селективной сборки микрообъективов (ASM) и моделирование на компьютере сборки изделия (виртуальной сборки). Для минимизации технологических затрат соблюдаются различные необходимые меры, воздействующие на гарантию обеспечения требуемого допуска  $\delta Y_{zul}$ , который является качественным показателем  $Y$ :  $\Psi = \delta Y / \delta Y_{zul}$ .

На Рис. 9 отображена зависимость общих технологических затрат от соотношения допусков, показана зависимость себестоимости изготовления МО от величины допусков на изготовление деталей. Данный график носит качественный характер и показывает, что погрешности изготовления узлов и деталей приводят к большим затратам при сборке (трудоемкости сборки) из-за необходимости тщательной юстировки, контроля, многократных сборок-разборок, чистки и т.д. График показывает, что нужна автоматизация не столько сборки, как автоматизация (упрощение) юстировки и контроля. Принцип ASM изображен на Рис. 10.



**Рис. 9** Затраты на изготовление и сборку МО в зависимости от допусков



**Рис. 10** Принцип ASM

Действие ASM основывается на целенаправленной гарантии обеспечения требуемого допуска изготовления в сборке узлов («нулевая ошибка

производства») при максимальном использовании изготовленных деталей, а также при производственном допуске  $\delta X_i$ , который является грубее, чем требуемый допуск на неточность изготовления. Сборка узлов на основе определенной группы допусков элементов характеризует селективную компоненту, а процесс сборки узлов при целенаправленном воздействии на параметры производства деталей (для реализации определенного распределения вероятностей производственного допуска) - адаптивной компонентой ASM.

При разработке концепции линии использовались научные наработки и большой практический опыт по созданию автоматизированных линий сборки на основе применения ASM д.т.н. Zocher K-P (TU Ilmenau Deutschland) Zocher K-P принимал непосредственное и активное участие в разработке новой линии и содействовал в организации контактов между российскими и зарубежными коллегами.

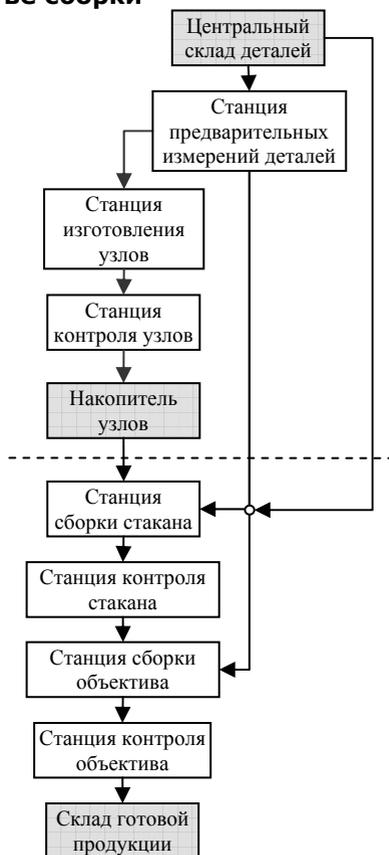
### Материальные потоки при производстве сборки

Характеристики производства, его функциональная направленность, последовательность, пространственная ориентация определяют работу автоматического транспорта, накопление деталей и распределение их потоков.

Характер транспортных связей влияет на технологическую компоновку основного и вспомогательного оборудования, эффективность использования производственных площадей и снижение капитальных затрат на строительные-монтажные работы. Следовательно, для выбора компоновки линии и транспортных средств надо оценить материальные потоки, их связи и мощность.

Наиболее оптимальным представляется создание двух независимых материальных потоков, следующих друг за другом (Рис. 11).

В данном случае мы имеем одну переналаживаемую станцию изготовления узлов. Готовые узлы поступают во временный накопитель и после достижения полного комплекта (после активации основного потока) будут поступать на сборку совместно с одиночными деталями в качестве подборок.



**Рис. 11** Схема материальных потоков деталей и узлов при раздельно-последовательной организации их движения

## Создание модели сборочной линии

Для обеспечения оптимальной работы сборки МО необходимо создать две независимые линии сборки, каждая из которых будет отвечать за выполнение определенных операций. Была создана комбинированная линия, имеющая две независимые ветви. Правое крыло линии производит сборку внутреннего стакана и объектива. Левое крыло линии позволяет производить сборку внутренних узлов объектива (Рис. 12).

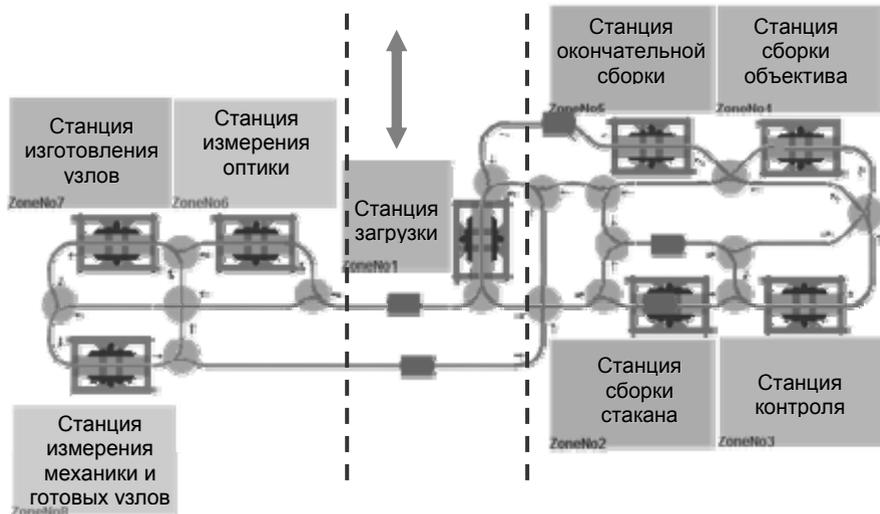


Рис. 12 Модель линии изготовления объектива (var. "ALETAB-Linie2")

Связь обеих ветвей линии с основным складом осуществляется по средствам мобильного склада через единую станцию загрузки.

## Автоматизация сборки узлов

Для организации работ по изготовлению узлов создана станция 7. Данная станция оборудована автоматизированным комплексом по изготовлению узлов «OptiCenter» (фирмы Trioptics) (Рис. 13).



Рис. 13 Автоматизированный комплекс «OptiCenter» фирмы Trioptics

## Виртуальная сборка объектива

Программа анализирует поступившие в базу данные об узлах и погрешностях в них. На основании полученных данных и заложенных критериев конечного результата программа автоматически подбирает такую

комбинацию узлов и деталей, которая обеспечивает минимальное значение абберационных погрешностей (Рис. 14).

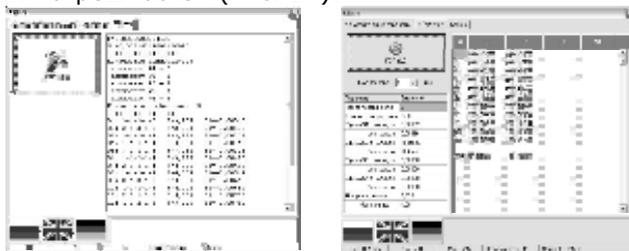


Рис. 14 Диалоговые окна программы виртуальной сборки

Выбранные узлы и детали виртуально блокируются и не участвуют в дальнейшем процессе подбора.

### Автоматизация сборки микрообъектива

Для проведения автоматической работы на транспортной линии и манипуляций при сборке используются 3-х координатная система фирмы IEF Werner (Рис. 15) и роботы [Adept Viper s850CX] (Рис. 16).

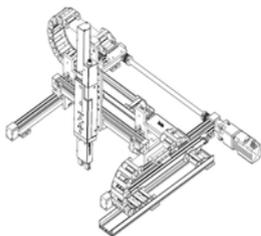


Рис. 15 3х координатная система позиционирования фирмы IEF Werner



Рис. 16 Робот фирмы Adept

### Автоматизация контроля качества изделия

В настоящее время наиболее распространенным способом контроля микрообъективов является метод контроля по качеству дифракционной точки. Данный способ довольно прост и в тоже время является очень информативным.

Функциональная схема макетов для контроля качества изображения, представлена на Рис. 17.

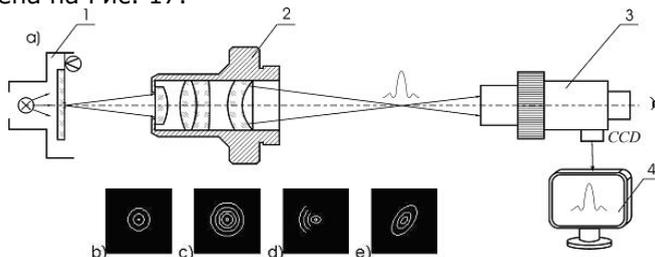
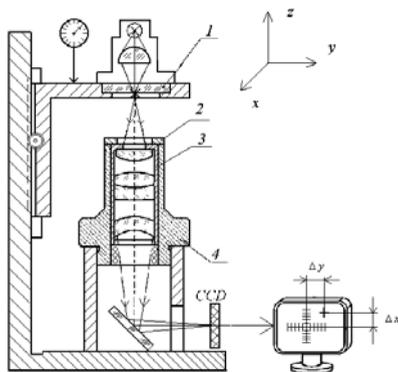


Рис. 17 Функциональная схема приборов контроля дифракционной точки

После сборки микрообъектива и коррекции его по абберациям необходимо произвести его адаптацию к револьверному механизму микроскопа.

Контроль высоты, а также контроль и юстировка «центровки» объектива (при необходимости) осуществляется на приборе контроля высоты. Функциональная схема представлена на Рис. 18.



**Рис. 18** Функциональная схема приборов контроля высоты и центровки

В настоящее время университетом ИТМО при участии TU Ilmenau и ряда предприятий создается автоматизированная линия сборки микрообъективов в рамках учебно-научной лаборатории по автоматизации сборки оптических устройств.

**В четвертой главе** рассмотрены методы точностного анализа; разработана методика и выполнены расчеты допусков на отдельные узлы и детали базовой конструкции унифицированного микрообъектива; разработан алгоритм виртуальной компенсации погрешностей, влияющих на целевые показатели качества изделия; продемонстрирована возможность эффективного использования адаптивно-селективной виртуальной сборки для повышения качества сборки.

Так как aberrации микрообъектива зависят от ряда технологических погрешностей оптических элементов, то допуски на них назначаются на этапе синтеза оптической схемы. Существенное изменение существующих конструкций микрообъективов при создании базовой унифицированной модели требует проведения анализа технологических погрешностей его элементов, влияющих на целевые показатели качества микрообъектива.

К целевым показателям качества микрообъектива относятся: показатели качества создаваемого изображения, точность рабочего отрезка (высоты) и центровка его механической и оптической (более правильно- эквивалентной узловой точки) осей. При контроле качества изображения объектива по дифракционному изображению точки можно определить наличие конкретных aberrаций (Рис. 17, b- хороший МО, с- сферическая aberrация, d- децентрировка, e- астигматизм), обусловленных действием конкретных технологических погрешностей.

Конструктор, зная перечень технологических погрешностей, влияющих на те или иные aberrации может назначить оптимальные допуски на отклонения соответствующих конструктивных параметров элементов.

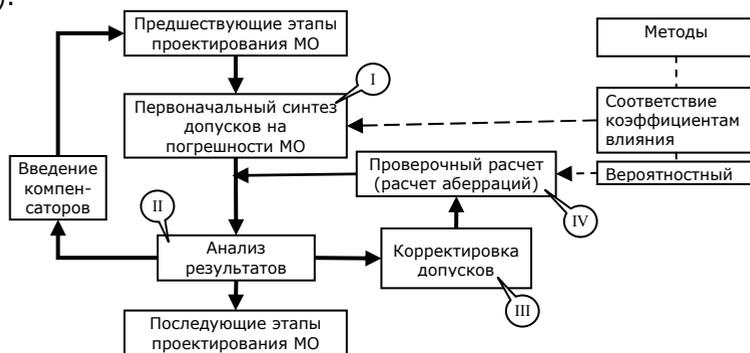
**На сферическую aberrацию** влияют следующие погрешности: показатели преломления оптических материалов; радиусов кривизны поверхностей линз; толщин линз и склеек по оси; воздушных промежутков. Компенсация сферической aberrации осуществляется относительно легко – изменением воздушного промежутка между определенными компонентами.

**На кому** влияют децентрировки поверхностей линз, которые являются комплексной величиной, обусловленной остаточными децентрировками поверхностей относительно базовых осей оправ, смещениями узлов в зазорах их посадок, наклонами узлов. Успешное устранение комы требует точного изготовления (центрирования) оптических узлов.

**Астигматизм** возникает из-за деформаций оптических компонентов при их закреплении в оправы, поэтому целесообразно ещё до операции сборки такие компоненты отбраковывать.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что для обеспечения требуемого качества изображения в первую очередь следует рассчитать допуски на первичные погрешности, обуславливающих возникновение децентрировок центров кривизны оптических поверхностей линз и склеек.

Существует достаточно много различных проектных и проверочных методов расчета точности изделий и допусков на их первичные погрешности. Анализ показывает, что целесообразно расчет допусков осуществлять на основе так называемого «комбинированного метода». Этот метод основан на том, что первоначальный синтез допусков на первичные погрешности осуществляют с помощью одного из известных методов проектного расчета, затем выполняют корректировку допусков, а управление процессом корректировки производят с помощью проверочного расчета. Расчет носит итерационный характер и состоит из четырех этапов (Рис. 19).



**Рис. 19** Расчет допусков и точности устройств при проектировании

Синтез допусков на первичные погрешности МО и значения влияющих факторов может быть осуществлен различными проектными методами, из которых для наших целей наиболее подходит «метод соответствия допусков коэффициентам влияния». Он основан на том, что суммарный допуск распределяется равнозначно между частичными погрешностями:

$$A_{q_1} \delta_{q_1} = A_{q_2} \delta_{q_2} = \dots = A_{q_n} \delta_{q_n}, \quad \text{где } A_q \text{ -- первичная погрешность, } \delta_q \text{ -- половина поля рассеяния погрешности}$$

Для случайных погрешностей, не имеющих систематических составляющих и распределенных по закону Гаусса, получим:

$$\delta_{q_i} = \frac{\Delta y_{vd}}{A_{q_i} \lambda_0} \quad \text{где } \Delta y_{vd} \text{ - допустимое значение аберрации, } \lambda_0 = \sqrt{n} \text{ - коэффициент,}$$

учитывающий количество и вид действующих погрешностей (влияний).

*Проверочный расчет* позволяет получить значение суммарной аберрации ( $\Delta y_{\Sigma}$ ), характеризующей качество проектируемого МО. Для наших целей наиболее целесообразно использовать «вероятностный метод» так как он основан на правилах суммирования случайных величин и учитывает наличие систематических составляющих случайных погрешностей и вид закона рассеяния последних. Учитывая, что среди технологических частичных погрешностей микрообъектива отсутствуют систематические, выражение для расчета суммарной аберрации (комы) запишем в виде:

$$\Delta y_{\Sigma} = \sqrt{\sum_i^{n_1+n_2} A_{q_i}^2 K_{p_i}^2 \delta_{q_i}^2}, \quad \text{где } K_q \text{ - коэф. учитывающий вид закона рассеяния погрешности,}$$

$n_1/n_2$  - числа случайных погреш., имеющих/не имеющих систематических составляющих

Так как, все первичные погрешности случайны и подчиняются закону Релея ( $K_g=1,14$ ), то расчет производим по следующей приближенной формуле:

$$\Delta y_{\Sigma} = \sqrt{\sum_i^{n_2} A_{q_i}^2 \delta_{q_i}^2}$$

В качестве примера были рассчитаны допуски на первичные погрешности, вызывающие децентрировку рабочих поверхностей линз базовой унифицированной модели микрообъектива ОСХ-40-0 (40x0,65). Расчет произведен исходя из критерия Марешаля для допустимого значения комы ( $\Delta Y_{vd}$ ) в центре поля:  $\Delta Y_{vd}=1,8\lambda/A'$ , при  $\lambda=0.546\text{мкм}$ ,  $A'=0,016$ , получаем:  $\Delta Y_{vd}=60.49\text{мкм}$ .

Для удобства задания и корректировки допусков на технологические погрешности вначале были рассчитаны их допустимые значения. Анализ полученных результатов показывает, какие погрешности оказывают наибольшее и наименьшее влияние, а также необходимые комбинации тех, которые не могут быть обеспечены.

При расчете суммарной комы подставляем значения технологических погрешностей, с учетом производственных возможностей при выпуске МО данного класса. Величина суммарного значения комы  $\Delta Y_{\Sigma} = 298.74\text{мкм}$ , что в 4,9 раза превосходит допустимое значение, по выбранному критерию. Это означает, что в микрообъективе требуется компенсация комы. В настоящее время, на практике прибегают к исправлению (компенсации) комы посредством сдвига одного из компонентов перпендикулярно оптической оси через отверстия в корпусе объектива. В данном объективе эту процедуру можно осуществить при помощи второго узла.

Стремясь уменьшить реальные значения комы, ужесточим допуски на изготовление деталей и узлов. Кроме этого, учтем, что посредством специальных приемов сборки возможно исключение влияния погрешности изготовления корпуса.

Произведя повторные расчеты получаем уменьшение значения комы, по сравнению с первоначальным. Теперь  $\Delta Y_{\Sigma} = 144.29\text{мкм}$ , что в 2,4 раза превосходит допустимое значение комы по выбранному критерию.

Данное обстоятельство показывает, что при сборке данного МО не обойтись без компенсационной подвижки второго компонента. Несмотря на то, что принудительное смещение компонента приводит как к исправлению комы, так и некоторым изменениям других aberrаций, данный способ нашел широкое применение в объективно-строении всех мировых производителей.

Однако при автоматизированной сборке осуществить эту юстировку в автоматическом режиме весьма проблематично. Поэтому нами была предложена несколько другая методика сборки микрообъектива. Суть нового способа заключается в том, что при изготовлении производится измерение численного значения остаточной децентрировки узлов и ее векторная направленность. Зная эти параметры, виртуально моделируем сборку объектива, так, чтобы разворотом компонентов (векторов децентрировки) добиться взаимокompенсации их влияния на кому. При этом программным путем подбираются не только узлы, но и определяется их взаимное расположение (разворот). Данная методика позволяет значительно упростить и облегчить механический процесс сборки объектива. Рассмотрим более подробно алгоритм решения.

Суммарная децентрировка  $\Delta e_{s,i}$  какой-то конкретной рабочей поверхности, содержит следующие составляющие:

$\Delta e_{s,i} = dc_i + \Delta s_i$ , где  $dc_i$ -векторное значение децентровки,  $\Delta s_i$ -зазор оправы-корпус.

Пусть для каждой поверхности в локальной системе координат  $Ox_iY_i$  известны радиальные координаты вектора децентрировки ( $dc_i, \varphi_i$ ). В оправе объектива поверхность расположена так, что угол между осями локальной и внешней неподвижной системы  $OXY$ , связанной с несущим цилиндром, равен  $\varphi_j$

(Рис. 20).

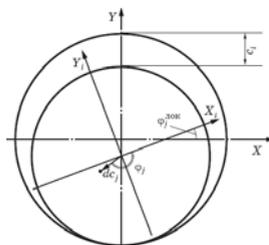


Рис. 20 схема положения поверхности линзы в стакане

На Рис. 21 представлено пятно рассеяния изображения точки, в случае, когда поверхности линз в оправе имеют погрешности децентрировок. В процессе эксперимента оправы линз поворачивались вокруг своих осей на углы с шагом  $5^0$ . В результате 16-ти циклов кома децентрировки уменьшилась до пренебрежимо малого значения, порядка  $\lambda/50$  (Рис. 22).

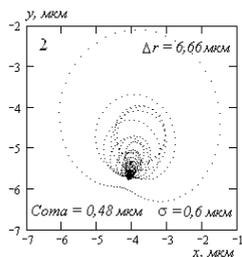


Рис. 21 пятно рассеяния до коррекции Комы

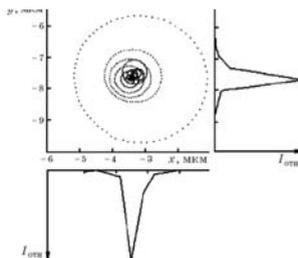
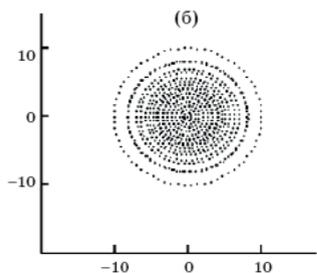


Рис. 22 результат коррекции Комы

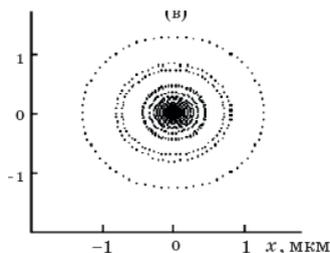
Поскольку технологические погрешности, кроме влияния на кому, влияют и на сферическую aberrацию, в программу виртуального моделирования был заложен расчет и этой aberrации.

Моделирование процесса виртуальной сборки осуществлялось по методу Монте-Карло. После подстановки исходных параметров и расчетов получили превышение сферической aberrации в 5 раз (Рис. 23). Коррекция сферической aberrации проводилась с помощью варьирования толщины воздушных промежутков между узлами.

Пятно рассеяния после коррекции удалось значительно улучшить (Рис. 24).



**Рис. 23** пятно рассеяния до коррекции сферической aberrации



**Рис. 24** результат коррекции сферической aberrации

После модернизации, в новой версии программы, стало возможно вводить данные не одного комплекта узлов и деталей, а неограниченного количества. Программа сама выбирает необходимый узел. В результате получаем не уменьшение погрешностей до минимально допустимых, а полное устранение таковых.

При тестировании программы, установлено - при изготовлении партии объективов 50-100шт. удается получить фактически идеальную картинку, а при партии свыше 100 шт. удается достичь 100% устранения aberrаций.

При создании автоматизированной линии сборки МО можно воспользоваться результатами совместной работы ТУ-ИТМО (каф. КиПОП, ТПС и др), ТУ-Ильменау (фак. Maschinenbau и др.), а также ряда российских и зарубежных фирм (НПП Фокус (СПб), Tetra AG, Montech AG, Gera-ident AG, Trioptics AG (Германия) и др.).

## **Заключение**

В результате выполненных в диссертации исследований и разработок были достигнуты следующие результаты:

1. Произведен анализ конструкций и технологических процессов сборки, выпускаемых МО, на основе которого сделан вывод о том, что:
  - а. Существующие конструкции и технологические процессы изготовления деталей и сборки МО обладают очень низкой степенью унификации.
  - б. Автоматизация процессов сборки МО в практике отечественного приборостроения не применяется.
2. Обоснована необходимость разработки базовой модели унифицированного объектива, на основе которой появится возможность унифицировать всю линейку МО, а также разработать принципиальную модель автоматизированной линии сборки и контроля микрообъективов.
3. Создана качественно новая базовая унифицированная конструкция механической части линзового МО и линейка модифицированных конструкций микрообъективов, что позволяет:  
значительно сократить сроки проектирования МО и технологической подготовки производства; снизить номенклатуру деталей и уменьшить затраты на их производство; вывести на уровень международных стандартов технические характеристики и дизайнерские показатели МО; заложить возможность автоматизации сборки и юстировки МО;
4. Выявлены основные первичные, технологические погрешности, которые влияют на целевые показатели качества собираемых МО. Разработана методика расчета допусков данных погрешностей, а также произведен расчет и анализ допусков основных (оптических) узлов МО.
5. Разработан алгоритм и программное обеспечение виртуальной сборки для компенсации погрешностей (кома и сферическая аберрация). Проведено компьютерное моделирование, которое продемонстрировало возможность эффективного использования адаптивно-селективной виртуальной сборки для повышения качества, при изготовлении МО.
6. Проанализированы технологические процессы изготовления деталей, сборки, юстировки и контроля микрообъектива и возможность автоматизации этих процессов. На основании данных исследований и положений ASM создана концепция автоматизированной сборки и определен оптимальный технологический процесс и схемы сборки, юстировки и контроля МО.
7. Разработана функциональная структура лаборатории сборки изделия и концепция линии автоматизированной сборки МО. Разработаны функциональные макеты рабочих станций (по измерениям, сборке и аттестации изделия и составляющих компонентов) и функциональные схемы стендов контроля целевых показателей качества.
8. Проведены экспериментальные исследования опытных образцов унифицированных микрообъективов.

Результаты данной работы могут быть использованы при разработке автоматизированной линии по сборке и контролю серийно выпускаемых МО. Представляется целесообразно продолжить работы по унификации конструкций эпиобъективов, зеркальных и зеркально-линзовых МО.

### **Список публикаций**

1. *Латыев СМ, Смирнов АП, Воронин АА, Падун БС, Яблочников ЕИ, Табачков АГ, Фролов ДН* -[RUS], *Тезка Р, Зочер П* -[DE] «Концепция линии автоматизированной сборки микрообъективов на основе адаптивной селекции их компонентов» // Оптический журнал. 2009. т.76. №7. с79-85.
2. *Латыев СМ, Смирнов АП, Табачков АГ, Фролов ДН* -[RUS], *Тезка Р* -[DE] «Обеспечение целевых показателей качества при автоматизации сборки микрообъективов» // Оптический журнал. 2010. т.77. №1. с49-53.
3. *Табачков АГ, Латыев СМ, Фролов ДН* «Унификация конструкций линзовых микрообъективов» // Оптический журнал. 2011. т.78. №1. с38-44.
4. *Tabachkov AG, Latyev SM, Frolov DN* -[RUS], *Zocher K.-P.* -[DE] «Die Haupttendenzen der Pprojektierung der Mikroobjektive»// 50 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium «IWK-50» / Technische Universität Ilmenau, 2005. s535.
5. *Tabachkov AG, Latyev SM, Frolov DN* -[RUS], *Zocher K.-P.* -[DE] «Basic Tendencies of Designing the Microobjectives» // 50 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium «IWK-50» / Technische Universität Ilmenau, 2005. s545.
6. *Tabachkov AG, Frolov DN, Vinogradova OA* «Optics for Luminescent Microscopy»// 51 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium «IWK-51»/ Technische Universität Ilmenau, 2006. s67.
7. *Tabatschkov AG, Latyev SM, Jablotschnikov EI, Padun BS, Frolov DN* -RUS], *Theska R, Zocher K.-P.* -[DE] «Laboratory for automated assembly of microscope lenses» // 53 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium «IWK-53» / Technische Universitaet Ilmenau, 2008. s247.
8. *Tabatschkov AG, Latyev SM, Jablotschnikov EI, Padun BS, Frolov DN* -RUS], *Theska R, Zocher K.-P.* -[DE] «Laboratorium zur automatisierten Montage von Mikroskopobjektiven» // Interner Workshop «Flexidle Montage» / Technische Universität Ilmenau, 2008. s45-56.
9. *Табачков АГ, Ермолаева ЕВ, Воронин АА* -[RUS], *Zocher K-P* -[DE] «Adaptive und Selektive Montage von Mikroskopobjektiven»//Interner Workshop«Flexidle Montage»/Technische Universität Ilmenau,2008.s40-45.
10. *Табачков АГ* -[RUS], *Zocher K-P* -[DE] «Учебно-научная производственная лаборатория» // Interner Workshop «Flexidle Montage» / Technische Universität Ilmenau, 2008. s98-107.
11. *Табачков АГ, Латыев СМ* «Унификация конструкций линзовых микрообъективов» // Interner Workshop «Flexidle Montage» / Technische Universität Ilmenau, 2010. s73-81.
12. *Табачков АГ* -[RUS], *Zocher K-P* -[DE] «Модель и алгоритм работы линии сборки» // Interner Workshop «Flexidle Montage» / Technische Universität Ilmenau, 2010. s26-33.
13. *Табачков АГ* «Реализация «виртуальной сборки» при изготовлении внутреннего стакана»// Interner Workshop «Flexidle Montage»/Technische Universität Ilmenau, 2010. s66-72.
14. *Tabatschkov AG* -[RUS], *Zocher K.-P.* -[DE] «Die Realisierung der Montage des Objektives» // Interner Workshop «Flexidle Montage» / Technische Universität Ilmenau, 2010. s96-105.

15. *Tabachkov AG, Frolov DN, Livshits IL* –[Rus], *Unchung Cho* –[UK] «Light microscopes – design for use of digital technologies» // V International Conference Optics-Photonics Design & Fabrication «ODF-06» / Япония, Nara, 2005. s578-589.
16. *Tabachkov AG, Latyev SM, Frolov DN* «Unification of microscope objectives in view of the assembly» // International Conference Optical Fabrication «Optifab-2011» / Северная Америка, New York, 2011. s467.
17. *Табачков АГ, Латыев СМ, Смирнов АП, Воронин АА, Тезка Р, Цохер П* «Учебно-научная лаборатория автоматизации сборки МО»//V международный оптический конгресс «Оптика–XXI век»/Россия, СПб, 2008.с90.
18. *Табачков АГ, Латыев СМ, Фролов ДН* «Унификация конструкций микрообъективов с учетом автоматизации их сборки» // VI международный оптический конгресс «Оптика – XXI век» / Россия, СПб, 2010. с78.
19. *Табачков АГ, Латыев СМ, Смирнов АП, Воронин АА, Фролов ДМ, Тезка Р, Цохер П* «Учебно-научная лаборатория автоматизации сборки МО» // VII Международная конференция «Прикладная оптика-2008» том1, / Россия, СПб, 2008. с34-40.
20. *Табачков АГ, Латыев СМ, Фролов ДН* «Унификация конструкций МО с учетом автоматизации их сборки» // IX Международной конференции «Прикладная оптика-2010» / Россия, СПб, 2010. с56-61.
21. *Табачков АГ* «Унификация конструкций микрообъективов»//XXXIX научно-методическая конференция СПбГУ ИТМО / Россия, СПб, 2010.с45-50.
22. № ИЗ-2100830 Патент РФ на изобретение -Окулярная система // Фролов ДН, Табачков АГ, Фрейдберг НЛ -1997.
23. № ИЗ-2102784 Патент РФ на изобретение -Окулярная система // Фролов ДН, Табачков АГ, Фрейдберг НЛ -1998.
24. № ИЗ-2104576 Патент РФ на изобретение -Высокоапертурный планохроматический МО // Фролов ДН, Табачков АГ, Фрейдберг НЛ -1998.
25. № ИЗ-2164701 Патент РФ на изобретение -Окулярная широкоугольная система // Фролов ДН, Табачков АГ, Фрейдберг НЛ -2001.
26. № ИЗ-2167443 Патент РФ на изобретение -Светосильный планохроматический микрообъектив среднего увеличения // Фролов ДН, Табачков АГ, Фрейдберг НЛ -2001.
27. № ИЗ-2176806 Патент РФ на изобретение -Безрефлексный безиммерсионный планохроматический высокоапертурный микрообъектив большого увеличения // Фролов ДН, Табачков АГ, Фрейдберг НЛ -2001.
28. № ПМ-19596 Патент РФ на полезную модель -Окулярная насадка микроскопа // Рагузин РМ, Фролов ДН, Табачков АГ, Негода ТВ 2001.
29. № ИЗ-2187136 Патент РФ на изобретение -МО с увеличенным рабочим расстоянием // Фролов ДН, Табачков АГ, Фрейдберг НЛ -2002.
30. № ИЗ-2195008 Патент РФ на изобретение -Планохроматический высокоапертурный микрообъектив малого увеличения // Фролов ДН, Табачков АГ, Фрейдберг НЛ -2002.
31. № ИЗ-2188444 Патент РФ на изобретение -Планохроматический безрефлексный микрообъектив малого увеличения // Фролов ДН, Табачков АГ -2002.
32. № ПМ-32612 Патент РФ на полезную модель -Апохроматический объектив // Алексеева НН, Крынин ЛИ, Лаппо ЛМ, Пименов ЮД, Сокольский МН, Табачков АГ, Фролов ДН -2003.



Тиражирование и брошюровка выполнена в  
учреждении «Университетские коммуникации»  
197101, Санкт-Петербург, Саблинская ул. 14  
Тел: (812)233 46 64  
Корректор Латыев С.М.

Тираж 100 экз. Объем 1.0 у.п.л.