

УДК 681

## ОБ ОПЫТЕ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭМИССИОННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖАЮЩИХ СИСТЕМ

Ю. В. Куликов

НИИ электронных приборов, Москва, Россия

*В статье отражен личный взгляд автора на опыт создания программно-методического обеспечения для расчета электронно-оптических эмиссионных изображающих систем. Затронуты научные, технические и организационные аспекты проблемы, в решении которой автор длительное время принимал участие как в качестве исполнителя, так и научного руководителя работ. Приведена краткая характеристика полученных результатов, в том числе современной версии пакета прикладных программ для расчета эмиссионных электронно-оптических изображающих систем ELM-E (DOS) 1.2. Материал статьи может быть полезным специалистам, работающим в области электронно-оптического приборостроения, в том числе занимающимся проблемами вычислительной электронной оптики.*

Первые опыты автора в области электронной оптики эмиссионных изображающих систем относятся к началу 60-х годов, когда он был привлечен к этим работам Г. В. Дер-Шварцем — одним из ведущих в то время специалистов

области теоретической и прикладной электронной оптики. Это было время интенсивного развития электронно-оптического приборостроения, в том числе особого класса приборов, в которых для формирования электронного изображения применялись т.н. эмиссионные электронно-оптические изображающие системы (эмиссионная электронная микроскопия, электронно-оптические преобразователи изображения, электронные камеры для регистрации быстропротекающих процессов, проекционные системы электронной литографии с переносом изображения и т. д.). В техническом арсенале лаборатории Г. В. Дершварца того времени были построенный им сеточный электроинтегратор [1], аналогичный известному электроинтегратору Либмана [2], но с более высокими характеристиками (40x100 узлов сетки, погрешность моделирования электростатического потенциала порядка сотых долей процента), электролитическая ванна и настольные клавишные калькуляторы. Этих средств, как быстро удалось выяснить, было вполне достаточно для расчета коэффициентов аберраций до третьего порядка включительно одиночных электростатических и магнитных (без насыщения) линз, что в значительной степени покрывало потребности электронной микроскопии просвечивающего типа и электронно-лучевых приборов технологического назначения. Известные вычислительные трудности, связанные с необходимостью расчета третьей и четвертой производных потенциала в выражениях для коэффициентов аберраций, здесь обходились с помощью процедуры интегрирования по частям. Этот прием позволял в коэффициентах аберраций понижать порядок производных потенциала до второго включительно и выводил более высокие производные в постоянные члены на границы области интегрирования, где эти производные, в случае одиночных линз, естественным образом обращаются в нуль. В результате при весьма ограниченной точности массива потенциалов, определяемых на сеточном электроинтеграторе, удавалось получать вполне приемлемые для практики результаты.

Что касается эмиссионных изображающих систем, то упомянутые технические средства позволяли достаточно достоверно (с погрешностью порядка 2—5 %) определять лишь параметры первого порядка, в том числе положение крестовера, положение плоскости Гаусса и увеличение в центре рабочего поля прибора. При этом в зависимости от сложности задачи, время расчетов этих параметров для одного прибора занимало от нескольких месяцев до двух лет. С другой стороны, потребности практического приборостроения не ограничивались перечисленными параметрами. Как выяснилось в дальнейшем, потребовалось вычислять в пределах рабочего поля прибора пространственные и пространственно-временные частотно-контрастные характеристики (ЧКХ), пространственное (и временное) разрешение, степень пространственных и временных искажений (пространственная и временная дисторсия), диаметр входного зрачка, допуски на изготовление и сборку элементов электронно-оптической системы и т. д., причем в более короткие сроки. Кроме того, создаваемые вычислительные средства должны были постоянно адаптироваться к постоянно возрастающим требованиям к параметрам приборов и их развивающейся элементной базе. Эти вопросы и были в центре научных интересов автора в течение последующих 35 лет. Возвращаясь к началу деятельности, следует отметить, что значительный импульс работы по эмиссионной электронной оптике был получен в связи с заменой клавишных калькуляторов быстродействующей вычислительной машиной ("Урал-2"). Возможность резкого увеличения скорости вычислительных процедур существенно активизировала попытки расчета коэффициентов аберраций эмиссионных систем. Следует заметить, что уже в самых ранних работах по теории аберраций эмиссионных систем (Рекнагель [3], Арцимович [4]) отмеча-

лись основные трудности, связанные с ее применением. Эти трудности обуславливались наличием в знаменателях выражений для абберационных коэффициентов малого параметра, соответствующего начальной энергии электрона, и широкой апертуры (до  $90^\circ$ ) пучков в точках эмиссии. Судя по многочисленным публикациям по теории аббераций, большинство авторов во избежание возможных методических и технических ошибок, традиционно стремились получить собственные формулы для абберационных коэффициентов. Следуя этой традиции, автором под руководством Г. В. Дер-Шварца также были получены собственные выражения для коэффициентов аббераций эмиссионных систем с плоским катодом и электростатической фокусировкой как осесимметричных, так и подверженных малым возмущениям осевой симметрии (эллипсность, перекос осей, сдвиг) [5]. Последнее особенно важно в теории допусков. Независимо от способа получения выражения для коэффициентов аббераций имеют сложный вид и при их выводе нетрудно сделать ошибку, которую в дальнейшем весьма трудно обнаружить. Чрезвычайно актуальной представлялась задача тестирования этих выражений. Автором был предложен и апробирован весьма эффективный тест. Суть предложения состояла в том, что в произвольной осесимметричной системе условно сдвигалась ось. Система как бы становилась неосесимметричной. Разложение потенциала в ряд на новой оси легко получалось переразложением известного ряда [2] на старой оси с выделением неосесимметричных членов, содержащих в качестве малого параметра величину сдвига осей в различных степенях, вплоть до четвертой. Совершенно очевидно, что все члены абберационного разложения на старой оси должны обратиться в нуль, кроме отверстных аббераций (сферической и сферохроматической). Эта процедура была применена к полученному абберационному разложению и позволила устранить все ошибки, связанные с их выводом. Однако из-за отсутствия в то время подходящих аналитических тестов проверить правомерность самого абберационного подхода для случая эмиссионных систем не представлялось возможным. Параллельно с работами по теории аббераций под руководством Г. В. Дер-Шварца шло создание уникального сеточного электроинтегратора, с помощью которого удалось моделировать распределения функций возмущения потенциала, вызванных малыми неосесимметричными возмущениями границ (электродов) [6] в приближении Брунса-Бертена [7, 8]. Этот электроинтегратор был тщательно протестирован на известной аналитической модели [9]. Другой, не менее важной задачей, связанной с расчетом эмиссионных систем, была задача расчета разрешающей способности. Большинство публикаций на эту тему вращалось вокруг обоснования необходимого коэффициента в известной формуле для сферохроматической абберации второго порядка Лэнгмюра-Рекнагеля-Арцимовича [10, 3, 4], который позволил бы по кружку рассеяния вычислять разрешающую способность прибора в центре поля. Эти попытки не имели под собой научной основы, т. к. не учитывали статистического характера эмиссии, т. е. реальных угловых и энергетических распределений электронов, эмитируемых катодом, и не имели прямой связи с частотно-контрастной характеристикой прибора, которая, как известно, при заданной функции контрастного разрешения приемника изображения (например, экрана) и определяет разрешение прибора. Автору были известны только три публикации, в которых этот вопрос решался на строгой научной основе [11—13]. Результаты этих работ являлись важными с методической точки зрения, но имели весьма ограниченное практическое применение, поскольку относились к очень узкому классу эмиссионных электронно-оптических систем с однородными электромагнитными полями. Статистика эмиссии ограничивалась максвелловским энергетическим и ламбертовским угловым распреде-

лениями эмитируемых электронов, полученные аналитические выражения для частотно-контрастных характеристик относились к отдельным плоскостям установки приемника изображения и с учетом только сферохроматической аберрации второго порядка. Идея численного метода, который снял перечисленные ограничения, была навеяна автору Герцбергером, который для характеристики распределения плотности световых лучей в изображении точки предлагал рассчитывать т. н. точечные диаграммы. Входной зрачок равномерно покрывался точками, через которые прогонялись световые лучи и в любой плоскости установки можно было наблюдать распределение точек внутри фигуры рассеяния. Для развития этой идеи применительно к эмиссионным системам необходимо было связать с каждым лучом вес, пропорциональный плотности тока в элементарный фазовый объем пространства начальных скоростей электронов в малой окрестности этого луча [14].

Этот метод условно можно назвать методом "насыпки", ибо он имитирует процесс насыпания песка в детской песочнице, где песчаная горка является аналогом электронно-оптической функции рассеяния точки. Эта функция, являющаяся в изопланатичных системах базовой (функция Грина точечного источника), и определяет контрастные свойства изображения. Подобный метод несколько позже был предложен также в работе [15]. К сожалению, метод "насыпки" имеет существенный недостаток. Как показали численные эксперименты, для расчета функции рассеяния одной точки с погрешностью порядка 1 % требуется рассчитать с высокой точностью несколько сотен тысяч электронных траекторий. При существовавшей в то время технической базе вычислительной техники решение этой задачи прямым интегрированием уравнений движения из-за огромного объема вычислений представлялось нереальным. Было очевидно, что существенного сокращения объема вычислений можно достичь, только применения аберрационное разложение траектории, поскольку это разложение представляет собой достаточно простое алгебраическое выражение и для расчета отдельной траектории в заданной плоскости нет никакой необходимости каждый раз считать всю траекторию от начала до конца. Поскольку ни один из авторов публикаций по теории аберраций не подвергал сомнению правильность парааксиального уравнения и выражения для сферохроматической аберрации второго порядка, испытание метода "насыпки" было проведено на аналитических моделях Вендта [12] и Цуккермана [13], где прочие члены аберрационного разложения отсутствовали. Результаты численного моделирования процесса формирования функции рассеяния методом "насыпки" и расчета ЧКХ с высокой точностью совпали с данными, полученными аналитическим путем на описанных моделях. Время расчета частотно-контрастной характеристики прибора в центре поля с помощью имевшейся в то время в распоряжении автора ЭВМ (БЭСМ-4) с весьма скромным быстродействием составляло порядка 30 мин. Таким образом, вопрос научно-обоснованного подхода к расчету разрешающей способности в центре поля эмиссионного прибора в аберрационном приближении был закрыт. На основе численных экспериментов с использованием описанного метода и сравнения результатов расчета ЧКХ конкретных приборов с экспериментом было надежно установлено, что индикатрисса излучения реальных фотокатодов в красной области оптического спектра в условиях высокой напряженности электрического поля в окрестности фотокатода является более вытянутой в направлении нормали по сравнению с косинусным законом (Ламберт) [16]. В дальнейшем была показана принципиальная возможность учета остальных аберраций до третьего порядка включительно [17] и получено семейство обобщенных частотно-контрастных характеристик для косинус-кубичного

углового и параболического энергетического распределений электронов эмиттера. Это семейство, при правомерности использования указанных распределений, позволяло вычислять ЧКХ и разрешение электронно-оптических преобразователей в пределах рабочего поля с учетом дефокусировки, коэффициентов сферохроматической аберрации второго порядка, кривизны, астигматизма и дисторсии без применения ЭВМ.

Таким образом, к концу 60-х — началу 70-х годов в распоряжении автора были выверенные выражения для коэффициентов аберраций эмиссионных систем с электростатической фокусировкой как осесимметричных, так и претерпевших малую деформацию, научно-обоснованная методика расчета частотно-контрастных характеристик в приближении теории аберраций третьего порядка и одно из лучших в то время технических средств для расчета электростатических потенциалов и их возмущений, вполне оправдывавшее себя при расчете одиночных линз. Трудности, связанные с вычислением высших производных потенциала, по крайней мере, для линз с плоским катодом, легко преодолевались описанным выше способом. Казалось, что нет никаких препятствий к расчету таких важных характеристик эмиссионных линз, как кривизна изображения, дисторсия, частотно-контрастные характеристики и разрешение в любой точке поля, в произвольной плоскости установки приемника изображения, при произвольных функциях углового и энергетического распределений и любых функциях контрастного разрешения приемника изображения, а также расчету допусков на изготовление и сборку элементов электронно-оптической системы. К сожалению, попытки расчета этих величин для реальных приборов закончились полной неудачей. Г. В. Дер-Шварцем совместно с автором достаточно серьезно обсуждалась в то время гипотеза о неприменимости теории аберраций для эмиссионных систем. Научно-обоснованных аргументов в подтверждение этой гипотезы выдвинуть не удалось, однако косвенным ее подтверждением служило полное отсутствие публикаций как отечественных, так и зарубежных авторов по практическому применению теории аберраций для расчета эмиссионных приборов. В связи с этими обстоятельствами работы по расчету эмиссионных изображающих систем были прекращены. Интерес к этой проблеме снова возник в процессе воспроизведения автором результатов работы [18], связанной с задачей расчета проекционных систем для электронной литографии с переносом изображения и его фокусировкой в квазиоднородных электромагнитных полях. Был получено точное решение параксиального уравнения для чисто однородных электромагнитных полей, а также для случая квазиоднородных полей, породивших дополнительные возмущающие члены в виде аберрационного разложения решения неоднородного уравнения [19]. Таким образом, удалось полностью воспроизвести результаты работы [18] и обнаружить ряд интересных эффектов. Так, известное выражение для сферохроматической аберрации второго порядка удалось получить путем разложения точного решения в степенной ряд по малому параметру, причем не только в плоскости Гаусса (Ленгмюр [10], Рекнагель [3]), но и во всей области между катодом и плоскостью Гаусса за некоторым исключением. Это наводило на мысль, что и остальные коэффициенты аберраций можно интерпретировать как коэффициенты разложения точного решения по выбранной системе малых параметров. Исключение составляла малая область, непосредственно примыкающая к катоду, где для правильного описания поведения коэффициента сферохроматической аберрации необходимо было искусственно вводить некоторую дельта-функцию, описывающую скачок коэффициента сферохроматической аберрации. Природа обнаруженного скачка в то время была неясной и требовала отдельного анализа. Аналогичный эффект

наблюдался автором и при разложении точного решения параксиального уравнения для модели электронной линзы с гиперболическим полем (результаты не опубликованы). Автором была также уточнена известная формула для расчета угла поворота изображения в электронно-оптических системах с магнитной фокусировкой. В начале 70-х годов автором была предпринята очередная попытка максимально корректного вывода коэффициентов aberrаций эмиссионных электронных линз с комбинированными электромагнитными полями [20]. Следуя классическому подходу Шерцера [21], удалось путем исключения времени с помощью интеграла энергии преобразовать уравнения Лоренца в уравнение траекторий в комплексной форме без каких-либо ограничений, т. е. получить полный аналог уравнений Лоренца. Это уравнение было пригодно для описания движения частиц с любой начальной скоростью, эмитируемых в любой точке пространства электронной линзы, в том числе и катодом. Абберационное представление решения этого уравнения с целью максимального исключения ошибок было выполнено в "три руки". Кроме автора, эта работа была проделана Х. И. Фейгиным и М. А. Монастырским. С этой работы также началось многолетнее и весьма плодотворное сотрудничество автора с М. А. Монастырским в области электронной оптики эмиссионных изображающих систем. Полученное абберационное разложение открывало принципиальную возможность решения важной практической задачи, связанной с расчетом эмиссионных электронно-оптических систем с криволинейными образующими, в том числе с криволинейным эмиттером (катодом). Вторая проблема была связана с корректным разделением пространственных и хроматических aberrаций в виде самостоятельных членов абберационного разложения. Абберационные члены, связанные с кривизной поверхности катода, удалось "вытянуть" непосредственно из параксиального уравнения с помощью специальной замены переменной, перейдя к уравнению с подвижным началом. Удалось также выявить абберационные члены, связанные с кривизной прозрачных для электронов проводящих поверхностей (мелкоструктурных сеток) и кривизной поверхности приемника изображения (экрана). Существенную помощь в этой работе автору оказал А. Н. Игнатьев [21]. Учет перечисленных эффектов открывал дорогу для проверки правомерности абберационного подхода к расчету эмиссионных систем с помощью такого эффективного теста (модельная задача), каким представлялась электронно-оптическая система, состоящая из двух концентрических заряженных сфер (сферический конденсатор). Правомерность абберационного подхода косвенно подтверждал характер таких экспериментально наблюдаемых aberrаций, как кривизна и дисторсия. Обе эти aberrации имели квадратичную зависимость от радиус-вектора точки эмиссии, что предсказывается канонической теорией aberrаций. К этому времени к проблемам эмиссионной электронной оптики подключился ряд молодых и талантливых специалистов (М. А. Монастырский, А. Н. Игнатьев, В. Я. Иванов, Н. А. Смирнов, С. В. Колесников, В. А. Тарасов, С. В. Андреев), на которых легла основная их тяжесть. При этом автору, как научному руководителю работ, отводилась в основном роль постановщика задач и координатора. М. А. Монастырским была успешно решена отмеченная выше проблема скачка коэффициента сферохроматической aberrации [22—24]. Построенная им теория пограничного слоя в окрестности катода позволила устранить этот скачок и корректно решить упомянутую проблему разделения хроматических и геометрических aberrаций. Им впервые были получены коэффициенты хроматических aberrаций до третьего порядка включительно [24]. По предложению автора А. Н. Игнатьевым было обобщено на трехмерный случай точное решение известной задачи Кеплера о движении заряженной час-

тицы в поле центральных сил [25]. Точное решение далее было разложено в степенной ряд по малым параметрам до третьей степени включительно, что позволило впервые представить в аналитической форме коэффициенты аббераций эмиссионных электронно-оптических систем для весьма содержательной модели (сферический конденсатор), пригодной для проверки корректности абберационного подхода [26]. Н. А. Смирнову под руководством М. А. Монастырского удалось также получить в аналитическом виде коэффициенты аббераций в электромагнитном сферическом конденсаторе [27]. Однако решающим событием, обеспечившим дальнейшие успехи в решении рассматриваемой проблемы, следует считать работу В. Я. Иванова. В середине 70-х годов ему на основе метода интегральных уравнений первого рода с использованием кубического сплайна для аппроксимации поверхностной плотности заряда [28] удалось создать компьютерную программу расчета полей электростатических систем повышенной точности. Точность расчета поля по этой программе существенно (на несколько порядков) превосходила возможности описанного выше сеточного электроинтегратора Г. В. Дер-Шварца. На основе этой программы В. Я. Ивановым был создан первый (усовершенствованный в дальнейшем С. В. Колесниковым), пригодный для практического применения, пакет прикладных программ "Топаз", ориентированный в основном на расчет электронно-оптических преобразователей изображения [29]. Этот пакет включил в себя описанные выше теоретические достижения, в том числе по теории аббераций с криволинейными образующими, теории хроматических аббераций, тестовую задачу в виде сферического конденсатора и т. д. Испытания пакета "Топаз" подтвердили правомерность применения абберационного подхода к расчету эмиссионных систем и позволили выяснить причины прежних неудач автора в этом направлении. Ивановым В. Я. был проведен численный эксперимент, заключающийся в следующем. Последние значащие цифры точных значений потенциала и его производных в модельной задаче (сферический конденсатор) случайным образом последовательно закруглялись. При этом оказалось, что удовлетворительная точность расчета коэффициентов аббераций третьего порядка реализуется при более чем четырех верных знаках потенциала (естественный, определяемый стабильностью материала сопротивлений сетки, предел точности сеточного электроинтегратора Г. В. Дер-Шварца) [1]. Таким образом, именно ограниченной точностью сеточного электроинтегратора объясняются отмеченные выше неудачи применения абберационного подхода и появившиеся сомнения насчет его применимости к расчету эмиссионных электронно-оптических изображающих систем. Опытная эксплуатация этого пакета, помимо чисто программистских дефектов, выяснила ряд весьма принципиальных источников погрешностей, возникающих в результате численной реализации метода интегральных уравнений первого рода и теории аббераций эмиссионных систем. Как известно, методу интегральных уравнений свойственна особенность на границах. В рассматриваемом случае такой критичной границей является эмиттер. Подынтегральные функции для абберационных коэффициентов вблизи эмиттера также имеют особенность. В совокупности эти источники погрешностей требуют чрезвычайно высоких вычислительных ресурсов при отсутствии объективного критерия того, на каком уровне этих ресурсов достаточно для достижения необходимой точности вычислений. Эти проблемы были в значительной степени решены в работах М. А. Монастырского и А. Н. Игнатьева с участием автора [30]. М. А. Монастырский разделил всю область границ на ближнюю зону, включающую в себя эмиттер, и дальнюю зону, представляющую все остальные электроды. Ввиду простоты формы поверхности эмиттера и с учетом некоторых естественных условий, в том числе известных

соотношений между производными потенциала на поверхности эмиттера, особенность в ближней зоне удалось устранить аналитическим путем и тем самым существенно повысить устойчивость вычислений. Что касается aberrаций, то М. А. Монастырским было предложено использовать разложение параксиального решения по степеням малого расстояния от точки эмиссии до некоторой точки на оси симметрии (точки пересадки на алгоритм численного определения решений параксиального уравнения). Подобная процедура была применена А. Н. Игнатьевым к расчету коэффициентов aberrаций, где по предложению автора использовался специальный способ повышения точности интегрирования. Суть этого способа заключалась в том, что из подынтегральной функции вычиталось и прибавлялось ее аналитическое представление в виде степенного ряда. В результате разностный член уже не имел особенности и интегрировался численно более устойчиво, в то время как интеграл от оставшегося аналитического члена вычислялся точно. Перечисленные усовершенствования были реализованы в пакете "Топаз", а в середине 80-х годов — также В. А. Катешовым в пакете прикладных программ "Эфир", предназначенном для оптимизации эмиссионных электронно-оптических изображающих систем [31]. Достаточно подробное описание возможностей этого пакета и используемой в нем методической базы дано в монографиях [30, 33]. Как показал опыт эксплуатации упомянутых пакетов, описанные меры повысили вычислительную устойчивость, однако существенно снизить требования к вычислительным ресурсам не удалось. Оставался также ряд неприятных моментов. Во-первых, отсутствовал точный критерий для выбора плоскости пересадки в конкретной электронно-оптической системе; во-вторых, в силу чрезвычайной громоздкости выражений для aberrационных коэффициентов постоянно висела угроза появления ошибок как при их получении, так и при программировании; в-третьих, используемый здесь aberrационный подход не позволял рассчитывать временные aberrации, весьма существенные в электронно-оптических камерах для регистрации быстропротекающих процессов. Один из путей дальнейшего повышения устойчивости вычислений некоторое время виделся в применении переменного шага интегрирования параксиального уравнения и коэффициентов aberrаций, который не был реализован, и эффективность этой меры неизвестна. Анализ сложившейся ситуации, а также изучение других подходов в теории aberrаций позволили М. А. Монастырскому предложить метод  $\tau$ -вариаций, основанный на временном представлении коэффициентов aberrаций [32]. В рамках этого подхода удалось преодолеть недостатки, присущие пространственному представлению исходного уравнения для вывода коэффициентов aberrаций. Это естественным образом сняло проблемы с выбором шага интегрирования и плоскости пересадки, а также позволило получить единым образом все aberrации до третьего порядка включительно, в том числе пространственные, хроматические и временные для самого общего разложения электростатического и магнитного потенциалов в известный степенной ряд [2].

Численные эксперименты С. В. Колесникова подтвердили более высокую устойчивость основанных на этом методе вычислительных процедур и позволили существенно понизить требования к точности вычисления осевого распределения потенциала и его производных. Получение временных aberrаций открыло дорогу к применению метода "насыпки" для расчета временной функции рассеяния и прочих производных от нее характеристик времяанализирующих электронно-оптических камер. Метод  $\tau$ -вариаций оказался также пригодным для расчета любых электронно-оптических систем, в том числе зеркальных. Монастырскому удалось также обобщить результаты работы [21], связанные с вычис-

лением скачка коэффициентов аберраций на проводящих поверхностях типа мелкоструктурных сеток, расположенных в оптически действующей области электронно-оптической системы [30]. С учетом вышеизложенного можно утверждать, что проблема научно обоснованного подхода к расчету аберраций электронно-оптических систем работами М. А. Монастырского в принципиальном плане была закрыта. В случае осесимметричных электронно-оптических систем метод  $\tau$ -вариаций был программно реализован С. В. Колесниковым с участием М. А. Монастырского на ЕС.ЭВМ (пакет "Хронос"). Полевая часть пакета "Хронос" создана Колесниковым на основе основательного изучения им метода интегральных уравнений, реализованного в пакете "Топаз", а также дальнейшего усовершенствования этого метода, особенно в части повышения скорости и точности вычислений. Пакет был тщательно протестирован и длительное время находился в рабочей эксплуатации. В связи с использованием метода  $\tau$ -вариаций, помимо функциональных возможностей, реализованных в пакете "Топаз", пакет "Хронос" позволял также рассчитывать зеркально-линзовые системы и временные аберрации. С появлением персональных компьютеров этот пакет был адаптирован С. В. Колесниковым для использования в среде DOS на персональных компьютерах типа PC AT, начиная с модели PC AT 286 и выше (пакет GLASER). Время решения одной типовой задачи с использованием этого пакета на персональном компьютере типа PC AT 386/387 составляло порядка 1—3 мин, что представляется автору рекордной величиной. К сожалению в этом пакете не был реализован в полном объеме метод "насыпки". Этот метод, а также элементы машинной графики и монитора предполагалось реализовать в незаконченном пакете "OPTICS-2" (В. Я. Иванов). Этот метод успешно применен С. В. Андреевым совместно с автором в программах, предназначенных для расчета процессов формирования изображения в системах с микроканальными пластинами и для учета микролинзового действия мелкоструктурных сеток (не опубликовано).

В связи с перестройкой и постперестроечными реформами в России некоторые основные участники работ, главным образом программисты, изменили сферу своих научных интересов (В. А. Катешов, С. В. Колесников, В. Я. Иванов). Программное обеспечение перестало развиваться, а неразвивающиеся программы — это мертвые программы, к тому же финансирование их создания к середине 90-х годов полностью прекратилось. Было принято решение продолжать работу, опираясь на собственные ресурсы. Авторским коллективом (Ю. В. Куликов, М. А. Монастырский, В. А. Тарасов, А. Н. Игнатъев, С. В. Андреев) были предприняты энергичные усилия по дальнейшему развитию программного обеспечения для расчета эмиссионных электронно-оптических систем на более современной методической, программной и вычислительной базе. В результате за два с небольшим года удалось создать и протестировать пакет прикладных программ "ELIM-E (DOS) 1.2", предназначенный для расчета эмиссионных электронно-оптических изображающих систем, в том числе электронно-оптических преобразователей изображения и времяанализирующих электронно-оптических камер для регистрации быстропротекающих процессов (без учета кулоновского взаимодействия в электронном потоке и конечности скорости распространения электромагнитной волны в системе развертки изображения).

Этот пакет позволяет с высокой точностью рассчитывать электронно-оптические характеристики эмиссионных изображающих приборов с электростатической фокусировкой, в том числе:

увеличение в центре поля зрения;

масштабные искажения изображения как в статическом режиме, так и в режиме развертки изображения;  
 положение кроссовера;  
 пространственные, временные и пространственно-временные функции рассеяния в произвольной точке поля зрения;  
 пространственные и пространственно-временные частотно-контрастные характеристики в произвольной точке поля зрения для меридианного и сагиттального направлений штриховой миры с учетом реальных распределений эмитируемых электронов по углам и энергиям;  
 временную и пространственную разрешающую способность прибора;  
 глубину резкости изображения;  
 форму поверхностей острой фокусировки для меридианных и сагиттальных пучков.

Паят снабжен модулем управления вычислительным процессом (монитор ELIMON) и модулем машинной графики (DEMON). Расчет одной типовой задачи в полном объеме на персональном компьютере типа PC DX4 100 занимает порядка 1 мин. Пакет позволяет производить также траекторный анализ из любой точки пространства прибора, он открыт для дальнейшего развития в направлении расчета систем с магнитной фокусировкой, а также учета влияния неосесимметричных элементов, в том числе связанных с возмущением осевой симметрии (проблема допусков).

Автор ограничился рамками рассматриваемой проблемы, опустив такие важные задачи, как оптимизация, синтез, расчет допусков, реализация метода главного луча, учет влияния объемного заряда, конечности скорости распространения электромагнитной волны в динамических системах, мелкоструктурных сеток, а также анализ многочисленных практических приложений созданного программно-методического обеспечения. Все эти вопросы ввиду их объемности не могут быть раскрыты в ограниченных рамках одной статьи. По мнению автора, созданное упомянутым коллективом программно-методическое обеспечение для расчета эмиссионных электронно-оптических изображающих систем представляет собой логическое завершение (в рамках принятых физико-математических моделей) того направления работ, которое было намечено еще Г. В. Дер-Шварцем. При проведении этих работ автор стремился к органичному сочетанию аналитических и численных методов, а также их четкой практической направленности.

## Литература

1. Дер-Шварц Г. В., Нетребенко К. А. // Изв. АН СССР. Сер. Физическая, 1959.
2. Глазер В. Основы электронной оптики. — М., 1957.
3. Resknapel A. // Phys Z., 1941. V. 117. P. 67.
4. Арцимович Л. А. // Изв. АН СССР. Сер. Физическая, 1941. V. 8. P. 6.
5. Дер-Шварц Г. В., Куликов Ю. В. // Радиотехника и электроника, 1968. V. 13. С. 12.
6. Дер-Шварц Г. В., Куликов Ю. В., Белоножко О. Б. // Там же, 1966. № 11.
7. Bruns H. // Crelle Journ. Math., 1876. P. 82.
8. Bertein F. // Ann. radioelectr., 1947. V. 2. P. 7; 1948. V. 3. P. 11.
9. Власов А. Г., Шахматова И. П. // ЖТФ, 1962. Т. 32. С. 6.
10. Langmuir D. Proc. I.R.E., 1937. P. 25.
11. De Vore H. B. Proc. I.R.E., 1948. P. 26.
12. Wendt G. // Ann. radioelectr., 1955. V. 10. P. 39.
13. Бонштедт Б. Э., Дмитриевская Т. Г., Цуккерман И. И. // ЖТФ, 1966. Т. 96.

14. Куликов Ю. В. // Радиотехника и электроника, 1966. Т. 11. С. 12.
15. Hartly K. F. // J. Phys. D., 1974. P. 7.
16. Яворский Б. М., Детлаф А. А.: Справочник по физике. — М.: Наука, 1981.
17. Куликов Ю. В. // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20. С. 6.
18. O'Keeffe T. W. // IEEE Trans. Electron Devices, 1970. V. 6.
19. Куликов Ю. В. // Радиотехника и электроника, 1973. Т. 28. С. 11.
20. Куликов Ю. В., Монастырский М. А., Фейгин Х. И. // Там же, 1978. Т. 23. С. 1.
21. Игнатьев А. Н., Куликов Ю. В. // Там же. Т. 23. С. 11.
22. Монастырский М. А. // ЖТФ, 1978. Т. 48. С. 11.
23. Монастырский М. А., Куликов Ю. В. // Радиотехника и электроника, 1978. Т. 23. С. 3.
24. Монастырский М. А., Куликов Ю. В. // Там же, 1979. Т. 21. С. 10.
25. Ruska E. // Z. angew. Physik, 1933. V. 83. P. 9.
26. Игнатьев А. Н., Куликов Ю. В. Новые методы расчета электронно-оптических систем. — М.: Наука, 1983.
27. Смирнов Н. А., Монастырский М. А., Куликов Ю. В. // ЖТФ, 1979. Т. 49. С. 12.
28. Иванов В. Я., Ильин В. П. Типовые программы решения задач математической физики. — Новосибирск, ВЦ СОАН, 1975.
29. Иванов В. Я., Игнатьев А. Н., Куликов Ю. В. Численные методы решения задач электронной оптики. — Новосибирск, ВЦ СОАН СССР, 1979.
30. Ильин В. П., Катешов В. А., Куликов Ю. В., Монастырский М. А. Численные методы оптимизации эмиссионных электронно-оптических систем. — Новосибирск: Наука, 1987.
31. Il'in V. P., Kateshov V. A., Kulikov Yu. V., Monastyrsky M. A. Emission-Imaging Electron-Optical System Design. — Adv. in Electronics and Electron Physics, 1990. P. 78.
32. Монастырский М. А., Щелев М. Я. /Препринт АН СССР, ФИАН, 1980, № 128.
33. Колесников С. В., Монастырский М. А. // ЖТФ, 1989. Т. 59. С. 12.

*Автор благодарит всех перечисленных в статье участников этих работ за серьезный научный вклад в развитие электронной оптики, всех, кто оказал им посильное содействие, а также акад. РАН А. М. Прохорова, акад. РАН М. Я. Щелева, чл.-кор. РАН Л. Н. Курбатова, д-ра техн. наук В. И. Креопалова, канд. техн. наук В. Ю. Федорова за поддержку и внимание, проявленные ими при проведении этих работ.*

## EXPERIENCE OF TECHNIQUES AND SOFTWARE ELABORATION FOR EMISSION-IMAGING ELECTRONOPTICAL SYSTEM COMPUTATION

*Yu. V. Kulikov*

Research Institute for Electron Devices, Moscow, Russia

*A personal viewpoint of the author is laid down regarding techniques and software elaboration for computer-aided modeling of emission-imaging electron-optical system.*

*Scientific, technical, and organizational aspects of the problem are considered, in decision of which the author has been for a long period involved as a scientific chief and concurrently as an executor. A brief description of results being obtained is presented including modern version of the applied program package ELIM-E (DOS) 1.2 intended for emission-imaging electron-optical system computation. The presented paper can be useful for experts working in the field of electron optics and electron-optical systems design.*