

17-1336
6

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

УСПЕХИ
НАУЧНОЙ
ФОТОГРАФИИ

VI

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
О Т Д Е Л Е Н И Е Х И М И Ч Е С К И Х Н А У К
К О М И С С И Я П О Н А У Ч Н О Й Ф О Т О Г Р А Ф И И И К И Н Е М А Т О Г Р А Ф И И
Г О С У Д А Р С Т В Е Н Н Ы Й О П Т И Ч Е С К И Й И Н С Т И Т У Т и м . С . И . В А В И Л О В А

УСПЕХИ НАУЧНОЙ ФОТОГРАФИИ

Том VI

ТРУДЫ СОВЕЩАНИЯ
ПО ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ФОТОГРАФИИ
И КИНЕМАТОГРАФИИ

(Ленинград, 12—15 ноября 1957 г.)



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
Москва · 1959 · Ленинград

156 790

778,3
У-781

Ответственные редакторы:

канд. физ.-мат. наук *М. П. Ваников*

и канд. техн. наук *И. А. Черный*

156790

ЦЕНТРАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА
А. Н. Киргивской ССР

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий том «Успехов научной фотографии» посвящен проблеме высокоскоростной фотографии и кинематографии, представляя собой труды впервые проведенного в СССР совещания по высокоскоростной фотографии и кинематографии. Это совещание, созванное в Ленинграде 12—15 ноября 1957 г. Комиссией по научной фотографии и кинематографии АН СССР и Государственным Оптическим институтом им. С. И. Вавилова, преследовало цель объединить многочисленных советских ученых и инженерно-технических работников, специально занимающихся вопросами высокоскоростной съемки в самых разнообразных областях науки и техники.

Представленные на совещании доклады были посвящены разнообразным вопросам самой высокоскоростной съемочной техники, источникам света для нее и, наконец, многочисленным ее применениям. В настоящем томе опубликованы тексты большинства прочитанных докладов, а также авторские рефераты тех докладов, полные тексты которых не были представлены.

Существенным дополнением к совещанию послужила специально организованная выставка осветительной, съемочной и испытательной аппаратуры высокоскоростной фотографии.

Следует отметить, что данное совещание явилось одновременно 10-м Всесоюзным совещанием по научной фотографии (первое совещание такого рода происходило в Ленинграде в ноябре 1932 г.).

Акад. А. А. ЛЕБЕДЕВ

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО

Несколько дней тому назад все прогрессивное человечество отмечало сорокалетие Великой Октябрьской социалистической революции, которая преобразила нашу Родину, превратила ее из отсталой, почти лишенной промышленности страны в одну из самых мощных держав мира.

Об огромном скачке в развитии науки и техники в нашей стране красноречиво свидетельствуют успехи в области мирного использования атомной энергии, в создании уникальных ускорителей элементарных частиц, замечательных по своим качествам самолетов, межконтинентальных ракет и, наконец, в запуске искусственных спутников Земли. То обстоятельство, что эти достижения в той или иной степени связаны с использованием все более и более высоких скоростей, делает необходимым усилить внимание к вопросам разработки новых и совершенствованию существующих методов изучения быстро протекающих процессов. Одним из наиболее действенных и часто применяемых методов изучения таких процессов является высокоскоростная фотография, развитием которой сейчас уделяется много внимания как у нас, так и за границей, где регулярно, через каждые два года (начиная с 1952 г.) собираются международные конгрессы, посвященные этому вопросу.

В Советском Союзе ведутся во многих местах разнообразные по содержанию работы, связанные с изучением быстро протекающих процессов, но ведутся они, как правило, без должного обмена опытом, разрозненно, что не могло не сказаться отрицательным образом на развитии этих работ. Настало время для того, чтобы путем взаимного ознакомления с полученными в разных местах результатами, обмена накопленным уже немалым опытом исправить положение и наметить пути дальнейшего развития этих важных работ. Такая задача и стоит перед нашим первым совещанием, посвященным специально вопросам скоростной фотографии и кинематографии; одновременно оно является также 10-м Всесоюзным совещанием по научной фотографии.

В середине прошлого столетия была изобретена искровая фотография и впервые стало возможным фотографировать и исследовать такие явления, как распространение звуковых волн, полет пуль и многие другие быстро протекающие процессы. Этот метод сохранил свое значение и в наше время; в значительно усовершенствованном виде, используя многократные съемки через определенные промежутки времени, он с успехом применяется для изучения явлений, имеющих место при ударе, для исследования развития во времени взрывных реакций и т. д. Если в прежнее время скорость пуль представлялась предельной скоростью, которую может сообщить человек материальным телам, то теперь мы имеем самолеты, скорость которых вплотную приближается к скорости пуль, а скорость ракет в иных случаях больше чем на порядок превосходит эту

скорость. Распространение детонации и взрывных волн также происходит со скоростями, значительно большими, чем скорость пуль.

Все это выдвинуло новые требования и поставило новые задачи перед исследователями и конструкторами, сделало необходимым создание новых, более совершенных методов и конструкций, в частности, и в области высокоскоростной фотографии. И здесь мы имеем уже ряд весьма интересных разработок. Так, Л. А. Самуровым создана выпущенная небольшой серией камера для фотографирования (при непрерывном освещении) с частотой в 100 000 кадров в секунду, а в настоящее время проектируется камера для съемки с частотой в 10 млн кадров в секунду. Под руководством Г. Л. Шнирмана разработана камера, позволяющая получать 2,5 млн кадров в секунду, которая также выпускается небольшими сериями; ныне находится в стадии разработки камера для съемки с еще большей частотой.

Совсем новые возможности открываются в изучении быстро протекающих процессов в связи с применением для этих целей специальных электронно-оптических преобразователей, разработанных под руководством М. М. Бутслова, которые позволяют получать небольшие серии снимков при выдержках всего в несколько миллиардных долей секунды. Применение этих преобразователей для решения некоторых вопросов ядерной физики, проводившееся под руководством Е. К. Завойского, показало, что с помощью названных преобразователей возможно в принципе получить разрешение по времени, достигающее 10^{-14} сек. и обусловленное тем временем, которое требуется фотоэлектрону на прохождение через слой фотокатода.

Большое, если не решающее, значение для высокоскоростной фотографии имеет вопрос освещения и источников света, в особенности импульсных источников. В этой области в Советском Союзе проделана большая работа, которой на нашем совещании будет посвящен ряд докладов.

Высокоскоростная фотография уже сейчас находит у нас значительное и весьма разнообразное применение, несмотря на то, что до сих пор у нас еще не налажено производство необходимой аппаратуры. Нашему совещанию необходимо обратить на это обстоятельство внимание соответствующих организаций.

Изучение быстро протекающих процессов является весьма важной задачей, от успешного решения которой в сильной степени зависит развитие ряда передовых отраслей науки и техники, и здесь не последнюю роль может и должна играть высокоскоростная фотография.

В. Г. ПЕЛЛЬ

ИСТОЧНИКИ СВЕТА НЕПРЕРЫВНОГО СВЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ

Экспонирование изображений при высокоскоростной киносъемке осуществляется с весьма малыми выдержками. Даже при относительно невысоких частотах съемки выдержки имеют значения порядка 10^{-4} — 10^{-5} сек. Столь короткие выдержки определяют необходимость создания на объектах съемки чрезвычайно больших освещенностей. Необходимо учитывать также и то, что светочувствительность негативного материала при столь коротких выдержках снижается в 2—3 раза по сравнению со светочувствительностью, определяемой с использованием стандартного сенситометра при выдержке 0,05 сек. Так, для негативной пленки типа Д, имеющей номинальную светочувствительность около 350 единиц ГОСТа, практическая светочувствительность при выдержках в пределах от 1/10 000 до 1/20 000 сек. (камера СКС-1 при частоте съемки 2 000—4 000 сек.⁻¹) падает до 150 единиц ГОСТа. В качестве примера можно указать, что практически необходимые освещенности при съемке, например, камерой СКС-1 с частотой 4 000 сек.⁻¹ на негативной пленке типа Д при относительном отверстии объектива около 1 : 4, составляют величину порядка 600 000—700 000 лк.

Решение задачи создания столь высоких освещенностей на малых по размеру объектах больших затруднений не встречает, однако освещение больших поверхностей оказывается технически затруднительным и связано с необходимостью применения большого количества мощных осветительных приборов, потребляющих значительное количество электроэнергии. В ряде случаев приходится прибегать даже к использованию не всегда полноценного силуэтного освещения, позволяющего зарегистрировать на пленке лишь внешние контуры объектов съемки.

Продолжительность съемки с невысокими частотами до 100 000 сек.⁻¹, обеспечиваемыми серийными камерами СКС-1 и ФП-22, относительно велика и колеблется в интервале от 0,08 до 10 сек. Такая длительность съемки определяет необходимость применения для освещения объектов съемки источников света только непрерывного свечения.

К этим источникам света, при применении их для освещения объектов высокоскоростной киносъемки, предъявляются следующие основные требования.

Высокая яркость и малые размеры светящегося тела. Это требование связано с необходимостью применения прожекторной осветительной системы, перераспределяющей световой поток источника света для получения направленного луча света с большой силой света и малым углом рассеяния. Сила света прожектора, как известно, пропорциональна пло-

щади отражателя (или линзы) и яркости источника света; размер светящегося тела источника света в прожекторе определяет собой угол рассеяния света последнего. Необходимость создания больших освещенностей на ограниченных по площади объектах высокоскоростной киносъемки и предопределяет указанные требования к источнику света.

Высокая стабильность работы. Это требование связано с необходимостью получения одинаковой оптической плотности изображений на всех кадрах снятого фильма. Для большинства источников света постоянство мгновенного значения светового потока зависит также от рода питающего тока, что для питания этих источников света предопределяет необходимость применения исключительно постоянного тока.

Благоприятный спектральный состав излучения. Требование связано с необходимостью наиболее выгодного использования свойств светочувствительного материала, иногда также с учетом свойств объекта съемки. При применении цветной киноплёнки спектральный состав излучения источника света приобретает решающее значение для получения правильной или надлежащим образом измененной цветопередачи.

Высокая световая отдача. Это требование существенно главным образом для освещения значительных по площади объектов съемки и тогда, когда съемки проводятся не в специально подготовленных помещениях, где не всегда обеспечен подвод достаточно большой электрической мощности. Необходимо указать, что в практических случаях следует учитывать световую отдачу, включая в величину потребляемой мощности также и мощность, расходуемую в пускорегулирующих устройствах, являющихся необходимыми для многих источников света, в частности для всех газоразрядных и дуговых ламп.

Высокий срок службы. Требование, в первую очередь, сводится к исключению возможности выхода из строя источника света во время самой съемки и, во вторую очередь, связано с вопросами экономики, которые заставляют учитывать стоимость источника света и возможность легкой его замены.

Возможность кратковременного форсирования источника света на время съемки. Требование связано с перечисленными выше; его удовлетворение позволяет получить повышение яркости источника света с одновременным увеличением световойдачи. Однако форсирование источника света всегда ведет к уменьшению срока его службы, иногда к снижению стабильности и часто связано с возможностью аварийного (иногда со взрывом) выхода его из строя.

Основными источниками непрерывного свечения, которые в настоящее время применяются или могут применяться для освещения при высокоскоростных киносъемках, являются: угольная дуга высокой интенсивности, ртутная лампа сверхвысокого давления (РЛСВД), ксеноновая лампа сверхвысокого давления, лампа накаливания. Рассмотрим перечисленные источники света с точки зрения приведенных выше требований.

Угольная дуга высокой интенсивности постоянного тока средней мощности ($I=60 \div 100$ а) с невращающимся положительным углем диаметром $8 \div 10$ мм имеет высокую яркость порядка $60 \div 80$ ксб¹ и в этом отношении стоит на первом месте среди рассматриваемых источников света. Дуга большей мощности с применением специальных устройств (таких, как водяное охлаждение держателя положительного угля, воздушное направленное дутье, дисковый катод) может иметь яркость, превышающую 120 ксб.

¹ 1 стильб равен 10^4 нит.

Стабильность работы дуги может считаться лишь удовлетворительной; неоднородность состава угольной массы оболочки и фитиля положительного угля и возможное наличие мелких трещин часто приводит к колебаниям яркости, изменению спектрального состава излучения и перемещению разряда в пространстве, вплоть до его переброса на оболочку. Однако при соответствующем экспериментальном отборе углей вероятность перечисленных неполадок снижается. Безынерционность разряда ведет к необходимости использования для питания дуги только постоянного тока, получаемого через выпрямитель с устройством для сглаживания пульсации.

Спектральный состав излучения дуги характеризуется плавной кривой с пиками в коротковолновой области видимой части спектра; с некоторым приближением цвет свечения может быть определен цветовой температурой в интервале $5\,500 \div 6\,500^\circ$ К. Большая мощность излучения в коротковолновой части оптической области спектра чрезвычайно благоприятна для съемки ввиду того, что она совпадает с максимумом чувствительности фотографических материалов. Получение правильной цветопередачи при съемках на цветной пленке обеспечивается применением желтого светофильтра на источнике света или на объективе съемочной камеры, срезающего избыток коротковолнового излучения дуги.

Световая отдача дуги высокой интенсивности составляет $45 \div 65$ лм/вт; однако с учетом потерь на необходимом для стабильного горения балластном сопротивлении и потерь в преобразователе световая отдача падает до величины порядка 30 лм/вт (при питании от сети с напряжением $115 \div 125$ в).

Понятие «срок службы» для электрической угольной дуги прямо применено быть не может. Продолжительность горения одной пары углей обычно составляет от 15 \div 20 мин. для мощных дуг и до 2 ч. для дуг средней мощности; срок службы наиболее термически нагруженных деталей механизма дуговой лампы (держатель вращающегося положительного угля) составляет 100 \div 200 ч., однако эти детали обычно легко подвергаются замене.

Форсирование электрической угольной дуги высокой интенсивности, т. е. хотя бы кратковременное увеличение мощности, рассеиваемой на дуге, является невозможным. Это определяется тем, что рабочая точка на характеристической стильбамперной кривой дуги обычно выбирается в области, близкой к области неустойчивого горения, где дальнейшее увеличение силы тока не ведет к сколько-нибудь заметному росту яркости и начинает наблюдаться неустойчивое горение дуги, связанное с перебросами шнура разряда в различные точки положительного угля, включая и оболочку.

Следует указать, что, несмотря на отдельные недостатки дуги высокой интенсивности, она все же представляет большой интерес для освещения при скоростных киносъемках и благодаря своей большой яркости в ряде случаев является незаменимой.

Ртутная лампа сверхвысокого давления (РЛСВД) постоянного тока средней мощности (250 \div 1000 вт) имеет яркость 15 \div 20 ксб и колоколообразную форму светящегося тела. Применение сферического контротражателя в осветительном приборе позволяет повысить яркость на 25 \div 35% и получить форму светящегося тела, близкую к неправильному прямоугольнику.

Стабильность яркости разряда РЛСВД является высокой, однако наблюдается небольшое колебание пламени разряда, которое становится особенно заметным при наклоне лампы; при наклоне, превышающем 25° ,

лампа работать в обычных условиях не может, но применение магнитного дутья позволяет добиться нормальной работы лампы и при больших накланах. Разряд является практически безынерционным, поэтому при высокоскоростной киносъемке питание лампы должно производиться исключительно постоянным током от выпрямителя с устройством для сглаживания пульсации.

Спектр излучения РЛСВД является линейчатым с резко выраженными в видимой области линиями 407,7, 407,8, 435,8, 541,6, 577 и 579 мкм; излучение в красной области спектра отсутствует. С этим характером спектра следует считать при съемке определенным образом окрашенных объектов; съемка на цветных пленках при освещении РЛСВД с правильной цветопередачей невозможна.

Световая отдача РЛСВД средней мощности составляет $50 \div 65$ лм/вт мощности на лампе; с учетом потерь в балластном сопротивлении и преобразователе световая отдача падает до величины порядка 30 лм/вт. Срок службы лампы составляет при нормальном режиме около 100 ч.; к концу срока службы лампа начинает загораться с трудом и колба ее заметно темнеет. Выход лампы из строя иногда сопровождается опасным взрывом с разбрасыванием осколков кварцевой толстостенной колбы и паров ртути; затрудненное зажигание лампы обычно указывает на возможность взрыва, поэтому такую лампу следует снимать с эксплуатации заблаговременно.

Кратковременное форсирование лампы является возможным и дает хорошие практические результаты. В табл. 1 приведены результаты практических опытов, проведенных на кафедре учебной и научной фотографии и кинематографии МГУ с стандартными лампами РЛСВДШ-250, использовавшимися для целей люминесцентной цветной микрокиносъемки. Выключенная лампа РЛСВД может быть зажжена вновь лишь после ее полного остывания; после зажигания лампа разгорается не мгновенно;

Таблица 1

Напряжение на лампе (в)	Сила тока (а)	Мощность на лампе (вт)	Яркость (ксб)	
			без контротражателя	с контротражателем
70	4	280	15	21
76	6	456	26	36,5
80	7,5	600	33	46
86	9	775	38	53

стабилизации; стационарный режим устанавливается через $5 \div 7$ мин. после зажигания. При необходимости производства нескольких повторных съемок выгодно снижать силу тока в цепи полностью разгоревшейся лампы до $20 \div 30\%$ номинального значения, заключив последнюю в теплозащитный кожух для предохранения ее от чрезмерного охлаждения, могущего привести к потуханию; непосредственно перед моментом съемки силу тока следует довести до заранее выбранного повышенного сверх номинала значения, и произвести съемку, после которой сила тока снова снижается до первоначального значения. Регулировать силу тока выгодно путем шунтирования части балластного сопротивления. В таком режиме срок службы лампы уменьшается сравнительно незначительно.

Ксеноновая лампа сверхвысокого давления постоянного тока мощностью 1 квт имеет яркость светящегося тела около

25 ксб; форма светящегося тела, как и у РЛСВД, колоколообразная, но при использовании контротражателя становится почти прямоугольной, а яркость возрастает благодаря большей прозрачности разряда на $50 \div 60\%$. Стабильность работы ксеноновой лампы СВД является высокой, лампа в номинальном и форсированном режиме может работать и при значительном наклоне. Наблюдающееся слабое колебание пламени для большинства случаев съемки оказывается несущественным вследствие того, что в световом пятне осветительного прибора с ксеноновой лампой оно наблюдается только у обычно неиспользуемых краев. Разряд является практически безынерционным, поэтому к питанию лампы предъявляются те же требования, как и к питанию ртутной лампы СВД.

Спектр излучения ксеноновой лампы является практически сплошным с несколькими пиками в интервале $450 \div 500$ мкм и может быть с небольшим приближением охарактеризован цветовой температурой $6\ 000^\circ\text{K}$. Производство цветной киносъемки на негативных пленках типа ДС возможно практически без применения корректировочного светофильтра. Изменение режима работы на спектральный состав излучения лампы влияния не оказывает, что существенно облегчает регулирование освещения при цветной скоростной киносъемке путем регулирования силы тока в цепи лампы.

Срок службы лампы в номинальном режиме составляет ориентировочно $200 \div 500$ ч.; более точные данные пока отсутствуют ввиду относительно небольшого количества выпускаемых промышленностью ламп.

Ксеноновая лампа СВД может кратковременно работать в форсированном режиме; яркость разряда увеличивается приблизительно пропорционально величине мощности. Опыты показывают, что допустимо приблизительно двукратное временное повышение мощности по сравнению с номинальным значением; при этом значительно повышается давление внутри колбы лампы и не исключена возможность ее выхода из строя со взрывом, который, впрочем, возможен и при нормальной эксплуатации. Взрыв ксеноновой лампы несколько менее опасен, чем взрыв РЛСВД, вследствие отсутствия ртутных паров; однако лампу необходимо помещать внутри прочного кожуха.

Схема включения ксеноновой лампы СВД сходна с схемой питания РЛСВД, однако необходимо иметь в виду, что ксеноновая лампа имеет падение напряжения в разряде всего $20 \div 30$ в и, следовательно, при той же мощности потребляет большую силу тока, чем ртутная лампа. Зажигание лампы осуществляется высоковольтным (около 30 кв) импульсом от импульсного трансформатора и возможно как в холодном, так и в горячем состоянии лампы. Нормальный режим работы устанавливается через $0,2 \div 0,5$ сек. после зажигания лампы, т. е. практически мгновенно.

Л а м п а н а к а л и в а н и я прожекторного или кинопроекторного типа имеет независимо от мощности среднюю габаритную яркость порядка 3 ксб.

Стабильность работы лампы накаливания является очень высокой при неизменном значении питающего напряжения. Инерционность свечения, особенно у ламп с толстыми нитями (низковольтные лампы, лампы большой мощности), весьма велика и позволяет осуществлять питание переменным током; пульсация светового потока при этом не превышает $1 \div 2\%$ среднего значения и лишь у маломощных ламп сравнительно высокого напряжения, например КИЖ-1 (110 в, 150 вт), достигает приблизительно 7% .

Спектр излучения лампы накаливания в видимой части является чисто температурным с резким спадом в ультрафиолетовой области и для рассматриваемых ламп может быть охарактеризован цветовыми температурами (в номинальных режимах) в интервале $3\,000\text{--}3\,300^\circ\text{K}$. При изменении напряжения на лампе накаливания рассматриваемых типов в 1% цветовая температура изменяется в ту же сторону на $10\div 14^\circ\text{K}$. При цветовой температуре $3\,300^\circ\text{K}$ лампы позволяют получить неискаженную цветопередачу при съемках на цветной негативной пленке типа ЛН.

Световая отдача прожекторных и проекционных ламп накаливания при номинальном режиме составляет $28\text{--}32\text{ лм/вт}$; отсутствие необходимости применения балластных сопротивлений или дросселей делает лампу накаливания по коэффициенту полезного действия вполне конкурентоспособной с описанными выше источниками света, хотя вследствие малой яркости светящегося тела лампа накаливания в прожекторной системе обеспечить получение большой силы света не может.

Сроки службы прожекторных и проекционных ламп накаливания при номинальном режиме колеблются в интервале $25\div 100\text{ ч.}$, в зависимости от типа лампы, и лишь для маломощных ламп серии КПЖ (кинопрожекторные), имеющих цветовую температуру $3\,300^\circ\text{K}$, составляют $7\div 15\text{ ч.}$ Большинство ламп может нормально работать лишь в вертикальном положении с допустимым наклоном не свыше $\pm 15^\circ$; лампы же серии КПЖ работоспособны и при углах наклона до $\pm 45^\circ$. Лампа накаливания может кратковременно работать в форсированном режиме, давая при этом повышенный световой поток и увеличенную яркость тела накала.

Зависимость изменения силы света, светового потока, яркости, потребляемой мощности, силы тока, световой отдачи и срока службы ламп накаливания от изменения напряжения может быть выражена следующим соотношением:

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{U}{U_0}\right)^{m_H},$$

где H — искомое значение изменившегося параметра при напряжении U ,
 H_0 — номинальное значение параметра,
 U — измененное напряжение,
 U_0 — номинальное напряжение,
 m_H — показатель степени для параметра H .

Значения m_H для ламп накаливания с низкой световой отдачей около 16 лм/вт и для прожекторных и проекционных ламп накаливания приведены в табл. 2, откуда видно, что срок службы лампы накаливания при повышении напряжения снижается в очень значительной степени. Поэтому можно рекомендовать для каждого типа ламп следующую методику выбора рационального форсированного режима для освещения при скоростных киносъемках:

1. Для серии ламп накаливания данного типа определяется напряжение, при котором они перегорают мгновенно. Опыт следует производить, плавно повышая напряжение при помощи автотрансформатора, поместив лампу за листом органического стекла во избежание поражения осколками колбы в случае выхода лампы из строя.

2. Для съемки выбирается напряжение на лампах на 10% меньше, чем напряжение перегорания; сила тока в цепи лампы измеряется при этом режиме.

3. При работе в цепь каждой лампы включается индивидуальный плавкий предохранитель, рассчитанный на силу тока, соответствующую

выбранному форсированному режиму. Включение индивидуального предохранителя позволяет избежать взрыва при перегорании лампы, в большинстве случаев обязанного образованию внутри колбы дуги, сопровождающемуся значительным увеличением силы тока.

Таблица 2

Параметр лампы (H)	m_H	
	Лампы 16 лм/вт	Лампы 20 ÷ 30 лм/вт
Сила света m_I	3,61	3,08
Световой поток m_F	3,61	3,08
Яркость m_B	—	3,08
Мощность m_P	1,58	1,58
Сила тока m_J	0,58	0,56
Световая отдача m_{η}	—	1,3
Срок службы m_L	$-11,2\div -14,8$	$-13,2$

Для большинства прожекторных и проекционных ламп допустимо кратковременное (до $15\div 20\text{ сек.}$) повышение напряжения на $50\div 60\%$ от номинального с 6-, 7-кратным увеличением яркости, силы света и светового потока и снижением срока службы до $0,1\div 1\%$ от номинального.

Таблица 3

Источник света	Яркость (кcd)	Стабильность	Спектральная характеристика	Световая отдача* (лм/вт)	Срок службы (ч.)	Возможность форсирования
Угловая дуга высокой интенсивности ($5\div 15\text{ кВт}$)	$50\div 80$	Удовлетворит.	$5\,500\div 6\,500^\circ\text{K}$	$45\div 65$	—	Нет
Ртутная лампа сверхвысокого давления ($250\div 1000\text{ вт}$)	$15\div 20$	Высокая	Спектр излучения ртути	$50\div 65$	100	Да
Ксеноновая лампа сверхвысокого давления ($700\div 1500\text{ вт}$)	25	Высокая	$6\,000^\circ\text{K}$	$24\div 30$	около 200	Да
Проекционные и прожекторн. лампы накаливания ($300\div 2000\text{ вт}$)	3	Высокая	$3\,000\div 3\,300^\circ\text{K}$	$28\div 32$	До 100	Да

* Без учета потерь в пускорегулирующих устройствах.

Цветовая температура при этом возрастает до $3\,450\div 3\,500^\circ\text{K}$. Серийные зеркальные лампы накаливания типа ЗН позволяют осуществлять повышение напряжения на $70\div 80\%$.

В заключение приводим сводную таблицу описанных характеристик источников света для высокоскоростной съемки (табл. 3).

Приведенные сведения помогут осуществить выбор источников света для высокоскоростной киносъемки в различных условиях.

Д. А. ГОУХБЕРГ

СПЕКТРАЛЬНЫЕ, СВЕТОВЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КСЕНОНОВЫХ ДУГОВЫХ ЛАМП И ВОЗМОЖНЫЕ ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

(Реферат доклада)

Наиболее важным отличием ксеноновых дуговых ламп от подавляющего большинства других газоразрядных источников света, обладающих в той или иной степени явно выраженным селективным излучением, является непрерывный спектр излучения в видимой области, соответствующий цветовой температуре порядка $5\ 600^\circ\text{K}$. Указанный характер спектра излучения ксеноновых дуговых ламп приводит к тому, что эти лампы являются источниками света, наиболее приближающимися к естественному дневному свету. Наряду с видимым излучением дуга в ксеноне излучает также в ультрафиолетовой и в ближней инфракрасной части спектра.

Разработки промышленных типов ламп могут производиться как по линии создания ламп сверхвысокого давления ($10 \div 60$ ат), так и ламп высокого ($0,4 \div 3$ ат) давления.

Световые характеристики дуги в ксеноне (световой поток, световая отдача, яркость, сила света) могут изменяться в очень широких пределах в зависимости от типа ламп и их мощности. Основными факторами, определяющими светотехнические параметры ламп, являются: сила тока, давление газа в лампе и длина дуги. Изменяя эти факторы, можно получить лампы, обладающие самыми различными световыми характеристиками, как это видно из приводимой таблицы.

Мощность лампы (квт)	Род тока	Сила тока (а)	Напряжение на лампе (в)	Свет. поток (кэм)	Сила света (ксв)	Длина дуги (мм)	Размеры тела свечения (мм)	Яркость (ксб)	Свет. отдача (лм/вт)
1,0	~	40	25	32	3,5	5,0	5 × 2,4	25	32
0,3	~	20	15	4,6	0,5	1,0	1 × 2	30	15,3
0,1	~	8	12,5	0,6	0,1	0,3	0,3 × 0,5	50	6,0
3,35	~	100	33,5	150	16,0	4,5	4,5 × 3,0	82	45,0
1,0	~	50	20	27	3,0	2,0	2 × 2,2	90	27,0
2,0	~	80	25	33	4,2	1,0	1 × 2,8	150	16,5
1,2	~	50	24	30	4,0	4,0	4 × 2,5	30	25,0
1,0	~	57	19	22	2,8	2,8	2,8 × 3	25	22,0
2,0	~	112	19	32	4,1	3,5	3,5 × 4,2	25	16,0
1,5	~	65	23	51	5,0	3,5	3,5 × 3	36	34,0
0,035	~	2,5	14	0,55	—	0,9	0,9 × 0,9	28	12,7
3,0	~	44	70	95	8,5	50	50 × 5	2,9	31,7
6,0	~	55	110	210	18,5	100	100 × 6	2,9	35,0
10,0	~	90	110	360	31,0	110	110 × 9	3,0	36,0
3,0	~	80	37,5	96	38,0	25	25 × 8	4,5	32,0
1,0	~	22 ÷ 25	45	25	—	85	85 × 7	0,16	25,0

Можно считать, что яркость ксеноновых ламп B , так же как и сила света, измеряемая в направлении, перпендикулярном оси дуги, связана с силой разрядного тока I соотношением:

$$B \sim I^n,$$

где показатель степени n , в свою очередь, зависит от давления газа в лампе и определяется соотношением:

$$n = 2 - Cr,$$

где C — постоянная, по порядку величины равная 0,02, p — рабочее давление ксенона в лампе в атмосферах.

Исходя из предположения, что дуга в ксеноне является серым излучателем, представляется возможным путем измерений величины яркости и степени поглощения излучения α определять температуру дуги. Такие измерения показали, что при температурах порядка $11\ 000^\circ\text{K}$ величина α приближается к своему пределу, равному единице, а яркость дуги при этом уже не отличается от яркости черного тела при той же температуре.

Таким образом, яркость ксеноновых дуг может принципиально достигать очень больших значений, во всяком случае превышающих яркость угольных дуг.

Точно так же, рассматривая дугу в ксеноне как серый излучатель, можно определить максимальную величину световой отдачи, достижимую для этого источника света.

На основе анализа всех характеристик ксеноновой дуги представляется возможным наметить конкретные области применения, в которых ее положительные свойства проявятся бы наилучшим образом. Такими областями могут являться: кинопроекция и киносъемка цветных фильмов, фоторепродукционные работы, освещение сцен в театрах и студиях телевидения, прожекторы направленного заливающего света, цветная микрофотография, биология, медицина, агротехника, инфракрасная техника.

Возможности использования ксеноновых ламп могут быть расширены за счет эксплуатации их в режиме кратковременных периодических перегрузок по силе тока на $100 \div 200\%$

ЦЕНТРАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА
А. Н. КОЖЕВНИКОВ
156730

И. С. МАРШАК

ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ РАЗРЯДА В ТРУБЧАТЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМПАХ И ПРЕДЕЛЫ НАГРУЗКИ ЭТИХ ЛАМП

Скоростная фотография и кинематография несветящихся объектов требуют весьма больших освещенностей, которые во многих случаях не могут быть обеспечены с помощью постоянных источников света. В импульсных лампах в течение короткого времени рассеивается электрическая мощность, превышающая на несколько порядков мощность постоянно горящих ламп. Благодаря этому развитие импульсных источников света имеет большое значение для прогресса скоростной съемки. Для правильного использования существующих импульсных ламп и постановки задач по разработке новых типов необходимо иметь основные представления о физическом механизме газового разряда в этих лампах и о возможных изменениях режимов этого разряда. Настоящая статья касается трех важнейших моментов для трубчатых импульсных ламп из упомянутого круга вопросов, а именно: а) механизма и характеристики сильноточной квазистационарной стадии разряда; б) механизма зажигания; в) пределов нагрузки.

1. Сильноточная стадия разряда

Изложенные ниже представления основываются на исследованиях электрических и световых характеристик сильноточной стадии искрового разряда и, в частности разряда в трубчатых импульсных лампах. Эти исследования выполнялись с помощью катодного осциллографа, фотографической камеры с вращающимся зеркалом и интегрирующего фотометра [1—4]. В ходе исследований широко варьировались диаметр и длина разрядной трубки ламп, род и давление наполняющего газа и параметры питающего контура.

Результаты исследований были объединены в единое целое с помощью рабочей гипотезы о механизме разряда [5, 6]. Эта рабочая гипотеза исходит из следующей общей картины происходящих в лампе процессов. После образования самостоятельного разряда между катодом и анодом лампы в канале разряда выделяется значительная мощность. При этом температура, а следовательно, ионизация газа и электропроводность канала быстро возрастают. Последнее приводит в свою очередь к дальнейшему росту мощности разряда и т. д. В течение какого-то промежутка времени (от долей микросекунды до нескольких десятков микросекунд) в лампе идет весьма нестационарный процесс лавинного нарастания мощности и температуры разряда, совпадающий с одновременным взрывообразным расширением канала. Однако в дальнейшем этот сугубо нестационарный процесс заканчивается и в лампе устанавливается квазистационарный разряд, канал которого заполняет все внутреннее сечение разрядной трубки. Процесс нарастания мощности прекращается вследствие того, что достигается такая высокая степень ионизации газо-

вой плазмы, при которой свободный пробег электронов в ней определяется в основном не поперечным сечением нейтральных атомов, а поперечным сечением ионов (при этом электропроводность канала перестает зависеть от степени ионизации). В дальнейшем характеристики разряда меняются только вследствие изменения напряжения, прикладываемого к лампе (например, из-за разряда питающего конденсатора).

Квазистационарный разряд, излучающий основное количество света, обычно представляет наибольший практический интерес. Рассмотренные ниже характеристики относятся к сформировавшемуся квазистационарному разряду.

Приводимые ниже основные уравнения (1), (2), (3), описывающие механизм разряда в импульсных лампах, были получены посредством:

1) определения плотности тока в плазме на основе величины поперечного сечения рассеяния электронов ионам, вычисленного Гвоздочевым [7]; 2) использования формулы Сага для оценки степени ионизации плазмы (принималось, что плазма находится в термодинамическом равновесии); 3) допущения того, что энергия, подводимая к разряду (для случая трубчатых импульсных ламп считалось, что канал разряда после расширения до стенок трубки становится однородным по сечению и длине), расходуется в основном на рекомбинационное излучение (оценивалось как для водородного атома по Крамерсу [8]) и тепловые потери при рекомбинации ионов на стенках (оценивались также упрощенным образом).

$$\rho = \frac{2,4 \cdot 10^9}{T^{3/2}} \cdot \ln \frac{9k^2 T^2}{4e_0^4 (3,6 \cdot 10^{16} \cdot p_0 x)^{3/2}} \text{ Ом} \cdot \text{см}, \quad (1)$$

$$E = 6,45 \sqrt{\frac{p_0 V_i \cdot \rho x}{(1 - \eta) r}} \sqrt{\frac{T}{A}} \text{ В/см}, \quad (2)$$

$$\frac{\eta}{1 - \eta} = 4,15 \cdot 10^4 \frac{\sqrt{A} p_0 \cdot x \cdot r x}{V_i T}. \quad (3)$$

Здесь ρ — удельное сопротивление плазмы разряда, x — коэффициент, учитывающий поглощение плазмой собственного излучения, E — электрический градиент в плазме, T — ее температура, а x — степень ионизации (связанная с T формулой Сага: $\frac{x}{\sqrt{1-x}} = \frac{0,905}{\sqrt{p_0}} T^{3/2} e^{-5850 V_i/T}$), A , V_i и p_0 — атомный вес, потенциал ионизации и давление наполняющего газа, r — внутренний радиус разрядной трубки, η — КПД разряда как источника излучения, k — постоянная Больцмана, e_0 — заряд электрона.¹

В тех случаях, когда можно пренебречь поглощением плазмой собственного излучения ($x = 1$), эти уравнения вместе с уравнением Сага образуют полную систему, из которой по заданным значениям параметров импульсной лампы и ее питания (род и давление газа, длина и диаметр разрядной трубки, начальное напряжение на питающем конденсаторе²) могут быть вычислены все основные характеристики разряда, а именно:

¹ Некоторая неопределенность пределов интегрирования в выводе Гвоздочева дает в выражении для поперечного сечения иона не вполне определенный численный коэффициент. Точно так же оценка рекомбинационного излучения по формулам Крамерса, не учитывающая ряда атомных констант, может дать значение численного коэффициента в соответствующей формуле, сильно отличающееся от истинного. Для того чтобы уравнения (1)–(3) согласовались с экспериментальными данными в отношении ламп, необходимо в формуле Гвоздочева добавить коэффициент 0,36, а в формуле, оценивающей рекомбинационное излучение, — коэффициент 23.

² Емкость питающего конденсатора предполагается достаточно большой для того, чтобы можно было пренебречь фазой расширения канала разряда по сравнению с квазистационарной фазой разряда, в течение которой канал заполняет все внутреннее сечение разрядной трубки импульсной лампы.

1) его удельное сопротивление, по величине которого может быть определена длительность разряда и тем самым длительность вспышки импульсной лампы;

2) его коэффициент полезного действия как источника излучения

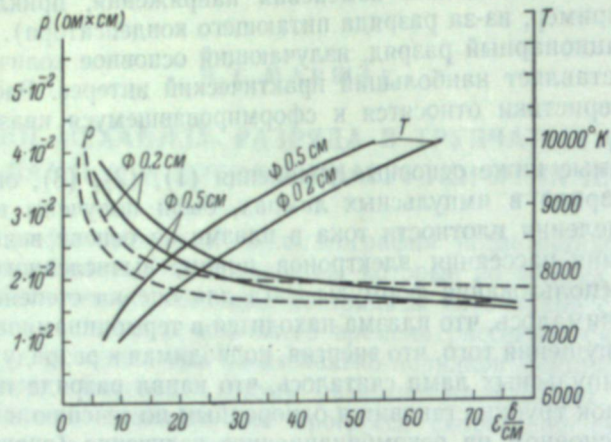


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления плазмы и ее температуры от электрического градиента в столбе разряда.

Сплошные линии — расчетные кривые, пунктир — экспериментальные данные.

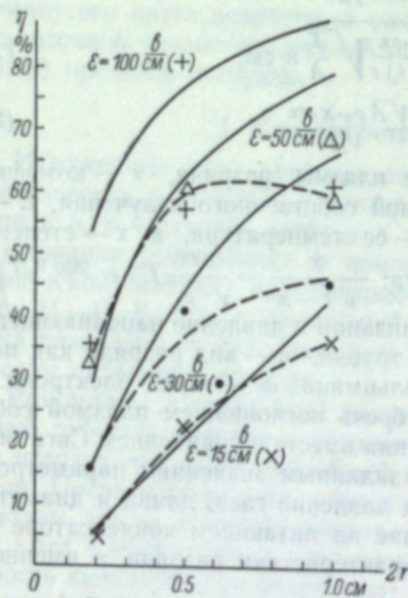


Рис. 2. Зависимость КПД разряда как источника излучения от внутреннего диаметра разрядной трубки при разных градиентах.

Сплошные линии — расчетные кривые при $C = \infty$, пунктир — экспериментальные данные при $C = 152$ мкф.

лах. Из уравнений (1), (2), (3), так же как из эксперимента следует, например, что при изменении давления газа в лампе от 10 до 20 мм рт. ст. ρ уменьшается только на 15%, а температура —

10%. При замене криптона аргоном ρ уменьшается на 20%, а при замене ксеноном — увеличивается на 15%. Вариация длины и диаметра разрядной трубки при постоянстве электрического градиента также вызывает изменение ρ не более чем на 10—20%. От электрического градиента ρ и T существенно зависят только в области малых значений E (рис. 1). Интересно отметить, что исследования конденсированного искрового разряда в атмосфере и в парах взрываемой электрическим током проволоки, изготовленной из самых различных металлов, во всех случаях давали значения удельного сопротивления плазмы, лежащие в пределах $1 \cdot 10^{-2} \div 4 \cdot 10^{-2}$ ом · см. Это вполне согласуется с представлением о кулоновском рассеянии электронов в плазме разряда, одинаковом для всех газов и паров.

2. Коэффициент полезного действия разряда как источника излучения в случае достаточно большой емкости питающего конденсатора C (обеспечивающей достаточную длительность квазистационарной фазы, в течение которой канал заполняет всю разрядную трубку), начиная с каких-то значений диаметра трубки $2r$, ее длины l и электрического градиента E практически перестает зависеть от размеров трубки и параметров питания.

На рис. 1—3 в качестве примера представлены уравнения (1), (2), (3) рассчитанные с помощью уравнений (1), (2), (3) графики для лампы с разными внутренними диаметрами ($\kappa = 1$) дают непрерывный, длиной 50 см, наполненный криптоном и замедляющийся ростном при давлении 100 мм рт. ст. η с увеличением $2r$ и E . Эксперимент показывает, что при E выше 50 в/см и $2r$ больше 5 мм поглощение плазмой собственного излучения начинает играть существенную роль.¹

Рассмотрение этих и подобных графиков, а также более подробный анализ уравнений (1), (2), (3) при одновременном сопоставлении с экспериментальными материалами позволяют сделать следующие выводы, которые частично отмечались уже ранее рядом авторов, проводивших экспериментальные исследования импульсных ламп [9, 10, 11].

1. Удельное сопротивление плазмы разряда и его температура меняются весьма мало при варьировании параметров импульсной лампы и ее питания в широких пределах.

2. Удельное сопротивление плазмы разряда и его температура меняются весьма мало при варьировании параметров импульсной лампы и ее питания в широких пределах.

3. Небольшая зависимость η от длины трубки, которая наблюдается только при малых l (η уменьшается с уменьшением l) и не вытекает из уравнений (1), (2), (3), может быть отнесена к тому, что при выводе этих уравнений предполагалась полная однородность канала разряда по его длине и таким образом не учитывались приэлектродные падения напряжения. Предположение о том, что при постоянстве плотности тока и длительности разряда излучение единицы длины трубки и приэлектродные падения напряжения должны быть постоянными независимо от l ,

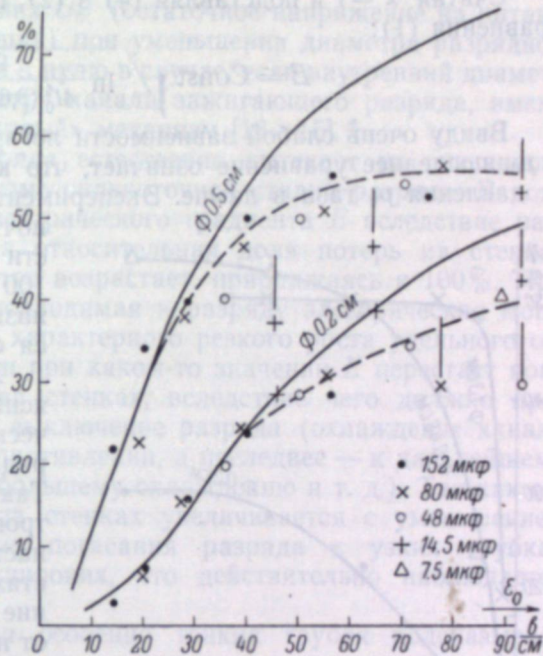


Рис. 3. Зависимость КПД разряда от электрического градиента при разных диаметрах разрядной трубки.

Сплошные линии — расчетные кривые при $C = \infty$, пунктир и точки — экспериментальные данные при $C = 7,5 \div 152$ мкф.

¹ При малых емкостях питающего конденсатора η уменьшается с увеличением $2r$ из-за того, что разряд не успевает заполнить внутренний объем разрядной трубки и значительная энергия расходуется на расширение канала.

позволяет определить величину приэлектродных падений, измеряя излучение ламп разной длины.

4. Из уравнений вытекает, что КПД должен увеличиваться с уменьшением потенциала ионизации газа и увеличением его атомного веса, что подтверждается и экспериментом, который для области наибольших значений η дает для аргона, криптона и ксенона отношение значений КПД соответственно как 100 : 130 : 160.

5. Из уравнения (3) следует постоянство КПД при выполнении следующего условия (для одного газа и постоянного E):

$$\frac{p_0 \cdot x \cdot x}{T} = \text{Const.}$$

Считая $x = 1$ и подставляя (4) в (2), находим для $\eta = \text{Const}$ с учетом уравнения (1):

$$E = \text{Const} \sqrt{\ln \frac{9k^2 T^2}{4I_0^4 (3,6 \cdot 10^{16} p_0 x)^{3/2}}}$$

Ввиду очень слабой зависимости логарифмического множителя от T и p_0 , последнее уравнение означает, что КПД почти не зависит от давления p_0 газа в лампе. Эксперимент действительно обнаруживает

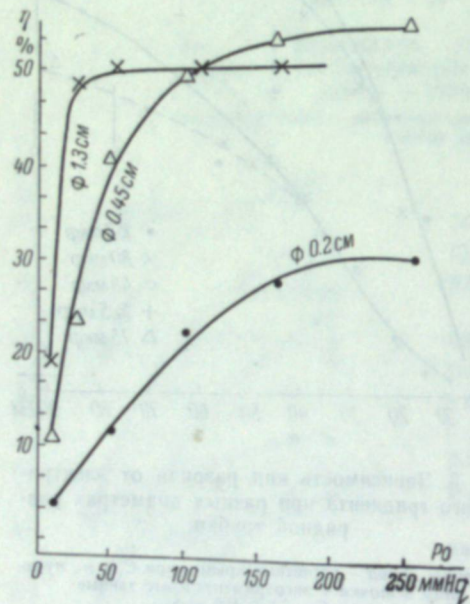


Рис. 4. Зависимость КПД разряда от давления криптона в трубчатых импульсных лампах длиной 50 см при различных внутренних диаметрах разрядной трубки. Градиент равен 40 в.

почти полное отсутствие зависимости η от p_0 при давлениях порядка 100 мм рт. ст. и выше. При более низких давлениях η уменьшается с p_0 .

Можно полагать, что это объясняется неполным термодинамическим равновесием в канале разряда при малых плотностях газа. Так как в случае малых диаметров трубки равновесие должно наступать при больших плотностях газа, то наименьшее значение p_0 , при котором η перестает от него зависеть, для узких трубок должно лежать выше, чем для широких, что согласуется с экспериментом (рис. 4).

Таким образом, названные выше физические представления, положенные в основу рабочей гипотезы о механизме сильноточной стадии разряда в импульсных лампах, позволяют путем несложных расчетов получить единую картину зависимости характери-

2. Механизм зажигания

Выработка представления о механизме зажигания разряда в импульсных лампах, осуществляемого с помощью маломощного высокочастотного импульса напряжения от пик-трансформатора [12], основывалась на учете следующих особенностей зажигания, установленных в ходе предварительной работы и в большинстве своем известных специалистам:

1. Определенность величины минимального напряжения $U_{з.}$ на питающей лампу конденсаторе, при котором данная лампа зажигается с помощью данного пик-трансформатора.

2. Значительно более низкая величина $U_{з.}$ для ламп, наполненных инертными газами, по сравнению с лампами, наполненными молекулярными газами.

3. Резкое возрастание $U_{з.}$ при добавлении к инертному газу небольших примесей молекулярного газа.¹

4. Снижение $U_{з.}$ при уменьшении давления газа, длины трубки и увеличении мощности зажигающего импульса.

5. Уменьшение разности между напряжением зажигания разряда $U_{з.}$ и напряжением его погасания $U_{п.}$ (остаточное напряжение на питающем конденсаторе после вспышки) при уменьшении диаметра разрядной трубки. Эта разность стремится к нулю в случае, если внутренний диаметр трубки приближается к диаметру канала зажигающего разряда, имеющего так называемый «стримерный» механизм [13—15].²

Механизм погасания разряда естественно вытекает из описанного выше представления о механизме сильноточной стадии разряда. В ходе разряда по мере снижения электрического градиента E вследствие разряда питающего конденсатора относительная доля потерь на стенках в общем балансе энергии быстро возрастает, приближаясь к 100%. При низких значениях градиента подводимая к разряду электрическая мощность быстро снижается из-за характерного резкого роста удельного сопротивления плазмы (рис. 1) и при каком-то значении E перестает компенсировать потери энергии на стенках, вследствие чего должно произойти резкое автоматическое выключение разряда (охлаждение канала приводит к увеличению его сопротивления, а последнее — к дальнейшему уменьшению мощности и еще большему охлаждению и т. д.). Так как относительная потеря энергии на стенках увеличивается с уменьшением диаметра канала, напряжение погасания разряда в узких трубках должно быть выше, чем в широких, что действительно наблюдается на опыте.

Сближение $U_{з.}$ и $U_{п.}$ для особенно тонких трубок подсказывает мысль о том, что зажигание разряда в импульсных лампах связано с процессом, обратным процессу его погасания. Созданный импульсом от пик-трансформатора канал ионизованной плазмы между катодом и анодом лампы может либо быстро деионизоваться, если мощность тока, проходящего в плазме под действием напряжения, приложенного между электродами, недостаточна для покрытия его тепловых потерь (случай отрицательного баланса мощности), либо начать расширяться, если мощность тока превышает тепловые потери (случай положительного баланса). В последнем случае происходит зажигание импульсной лампы, так как расширение канала приводит к еще большему превышению подводимой мощности, пропорциональной квадрату диаметра, над мощностью потерь, пропорциональной первой степени диаметра.³

¹ Трудность получения устойчивых значений $U_{з.}$ в процессе изготовления импульсных ламп с легкими инертными газами (аргон и особенно неон) может быть истолкована более сильным влиянием малейших газовых примесей, выделяемых в момент разряда из деталей лампы, на величину $U_{з.}$ в этих газах.

² Диаметр канала стримера при давлении 100 мм рт. ст. должен быть приближенно равен $0,2 \div 0,3$ мм.

³ Различием в соотношениях между подводимой и рассеиваемой мощностями для узкого и широкого канала объясняется значительная разница между напряжениями зажигания и погасания разряда в импульсных лампах с обычными диаметрами разрядных трубок.

На основе такого представления о механизме зажигания из уравнения баланса мощности в канале плазмы, первоначально созданном пик-трансформатором между катодом и анодом, могут быть выведены следующие важные соотношения:

$$(U'_3/U_3)^2 = 1 + K\theta, \quad (6)$$

$$K = \frac{1-x}{x} Q_1/Q_i + \frac{1-x}{x} Q_0, \quad (7)$$

$$U_3^2 = \text{Const} \cdot l^2 P_0 \left(A + \frac{\sqrt{p_0}}{B} Q_0 \tau^{3/4} e^{\frac{e_0 V_i}{2kT}} \right). \quad (8)$$

Здесь U_3 — напряжение зажигания в чистом инертном газе с поперечным сечением Q_0 рассеяния электронов нейтральным атомом; U'_3 — напряжение зажигания в том же газе, содержащем малую примесь (малая дробь) молекулярного газа с поперечным сечением Q_1 рассеяния электронов нейтральным атомом; T — температура канала плазмы, созданного зажигающим импульсом, x — степень ионизации, Q_i — поперечное сечение рассеяния электронов ионом в этом канале, A и B — константы, получаемые из уравнений Гвоздовера и Сага, p_0 — давление газа в лампе, l — расстояние между электродами, V_i — потенциал ионизации инертного газа, k — постоянная Больцмана, e_0 — заряд электрона.

Уравнения (6) и (7) не требуют для своего вывода никаких дополнительных предположений кроме того, что малая примесь молекулярного газа не влияет на характеристики канала плазмы, созданного зажигающим импульсом, а также того, что можно пренебрегать приэлектродными падениями напряжения в этом канале. Эти уравнения дают характер зависимости напряжения зажигания импульсной лампы от содержания примеси молекулярного газа. Особенный интерес представляет случай когда величиной xQ_i можно пренебречь по сравнению с $(1-x)Q_0$. Этот случай достаточно маломощного зажигающего импульса, создающего канал плазмы с низкой степенью ионизации, причем соответствующая температура канала должна быть ниже 5800°K для ксенона и 7900°K для аргона. При этом уравнение (7) принимает вид:

$$K = \frac{Q_1}{Q_0}. \quad (9)$$

В этом случае угловой коэффициент прямой (6), выражающей зависимость квадрата отношения напряжений зажигания в загрязненной и чистом газе от содержания примеси, равен отношению поперечных сечений рассеяния электронов атомами примеси и инертного газа.

Сопоставление уравнения (9) с обнаруженным Рамзауером [16] особенно малым поперечным сечением атомов инертных газов при энергиях электронов, соответствующих нескольким тысячам градусов Кельвина объясняет, почему импульсные лампы, наполненные чистыми инертными газами, обладают весьма низкими напряжениями зажигания и почему так сильно влияют на напряжение зажигания небольшие примеси молекулярных газов. Из уравнений (6) и (9) вытекает новая возможность экспериментального определения поперечных сечений рассеяния электронов атомами газов.

Для вывода уравнения (8) требуется принять, что поперечное сечение иона Q_i определяется формулой Гвоздовера, а степень ионизации x — формулой Сага, а также сделать несколько дополнительных предположений о механизме расширения канала и тепловых потерь на его границе. Это уравнение дает возможность оценить зависимость напряжений

зажигания от давления газа, длины лампы и мощности зажигающего импульса.

На основе приведенных представлений о механизме зажигания были проведены экспериментальные исследования зависимости напряжения от ряда параметров, некоторые результаты которых представлены на рис. 5—7. График, приведенный на рис. 5, иллюстрирует хорошее выполнение уравнения (6). График рис. 6 согласуется с представлением, вытекающим из уравнения (9), давая новый материал о соотно-

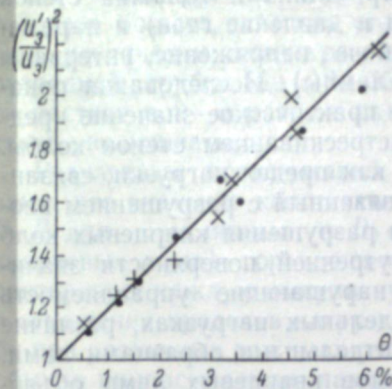


Рис. 5. Зависимость отношения квадратов напряжений зажигания в ксеноне с примесью азота и в чистом ксеноне от содержания азота в ксеноне.

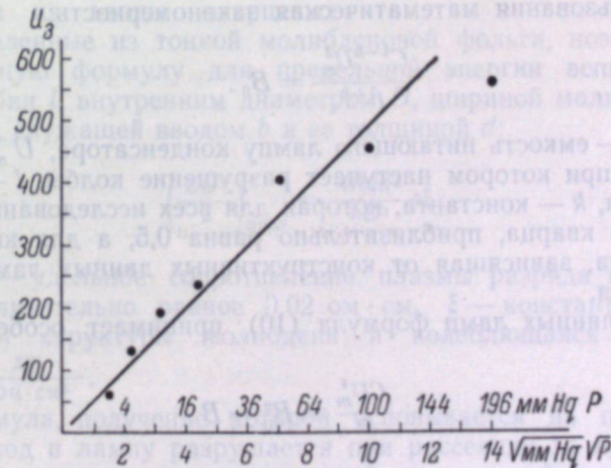


Рис. 7. Зависимость напряжения зажигания от квадратного корня из давления криптона.

шении поперечных сечений атомов. График рис. 7 иллюстрирует удовлетворительное выполнение уравнения (8).

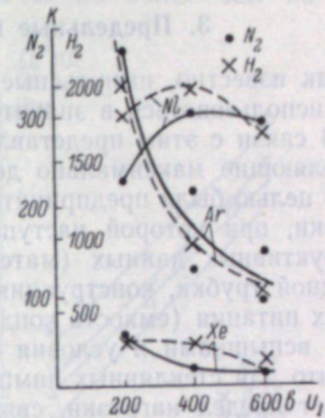


Рис. 6. Зависимость коэффициента K из уравнения (9) от напряжения на первичной обмотке зажигающего пик-трансформатора (определяющего температуру плазмы в канале, созданном зажигающим импульсом) для смесей ксенона, аргона и неона с азотом и водородом (масштаб ординат для водорода в 6 раз меньше, чем для азота).

Из описанного здесь материала следует, что предлагаемое представление о механизме зажигания импульсных ламп является гипотезой, удовлетворительно согласующейся с экспериментом и позволяющей вскрыть новые закономерности в работе импульсных ламп.

3. Предельные нагрузки импульсных ламп

Как известно, импульсные лампы могут при решении различных задач использоваться в значительно отличающихся друг от друга режимах. В связи с этим представляет интерес установить закономерности, определяющие максимально допустимые нагрузки в каждом режиме. С этой целью были предприняты исследования [17] зависимости величины нагрузки, при которой наступает разрушение импульсных ламп от их конструктивных данных (материал, диаметр, длина и толщина стенок разрядной трубки, конструкция вводов, род и давление газа) и параметров их питания (емкость конденсатора, рабочее напряжение, интервалы между вспышками и условия охлаждения лампы). Исследования показали, что для стеклянных ламп наибольшее практическое значение представляет предел нагрузки, связанный с растрескиванием стенок колбы. Для кварцевых ламп интерес представляет как предел нагрузки, связанный с разрушением колбы, так и предел, связанный с разрушением вводов. Опыт показывает, что различные виды разрушения кварцевых колб (растрескивание, взрыв и испарение с внутренней поверхности значительного количества двуоксида кремния, нарушающие управляемость ламп) наступают при весьма близких предельных нагрузках, различие между которыми меньше разброса между отдельными образцами ламп. Особенности значения предела нагрузки вводов кварцевых ламп объясняется тем, что в большинстве таких ламп используются вводы в виде полосок тонкой молибденовой фольги, вследствие чего ограничивается проводящее ток сечение ввода.

Из результатов исследований пределов нагрузки на колбу стеклянных и кварцевых ламп была выявлена следующая удобная для практического использования математическая закономерность:

$$\frac{C^{1-k} U_m^2}{l^{1+k}} = B_0. \quad (10)$$

Здесь C — емкость питающего лампы конденсатора, U_m — напряжение питания, при котором наступает разрушение колбы, l — длина разрядной трубки, k — константа, которая для всех исследованных рецептов стекла, кроме кварца, приблизительно равна 0,5, а для кварца — 0,45, B_0 — константа, зависящая от конструктивных данных ламп и условий их охлаждения.

Для стеклянных ламп формула (10) принимает особенно простой вид:

$$\frac{CU_m^4}{l^3} = B_0^2 = B. \quad (11)$$

На рис. 8 в качестве примера приведены данные экспериментального определения предельных нагрузок прямых ламп длиной 30 см и с внутренним диаметром около 5 мм, наполненных криптоном при давлении 100 мм рт. ст., работавших с интервалом 7,5 сек. при естественном охлаждении. Прямые линии соответствуют уравнению (11) с разными значениями B , относящимися к разным рецептам стекла.

Константа B для стекол разных рецептов меняется не более чем в 4 раза, для ксенона она приблизительно на 40% больше, чем для криптона. Увеличение давления газа от 50 до 250 мм рт. ст. увеличивает B приблизительно вдвое, варьирование диаметра и длины разрядной трубки в практически интересных пределах меняет B не более чем на 50%, варьирование толщины стенок от 0,8 до 2 мм меняет B не более чем на 10%, изменение интервала между вспышками от 1 до 8 сек. (прямые лампы с естественным охлаждением) увеличивает B приблизительно на 40%.

Для кварцевых ламп с внутренним диаметром разрядной трубки около 5 мм константа B_0 приблизительно в 3 раза больше, чем для стеклянных. При увеличении диаметра кварцевой разрядной трубки до 12—15 мм она возрастает в 2—3 раза, а затем перестает увеличиваться.

Результаты исследований показывают, что значение константы B (или $B \cdot l^3$ для стеклянных и $B_0 \cdot l^{1+k}$ для кварцевых ламп) гораздо полнее характеризует каждую импульсную лампу в отношении пределов нагрузки на колбу при различных режимах работы, чем обычно приписываемая лампе энергия вспышки, которая в зависимости от применяемой для питания емкости конденсатора может изменяться в десятки раз.

Результаты исследований пределов нагрузки на вводы кварцевых ламп, изготовленные из тонкой молибденовой фольги, позволили получить следующую формулу для предельной энергии вспышки лампы с длиной трубки l , внутренним диаметром D , шириной молибденовой полоски фольги, служащей вводом b и ее толщиной d :

$$\left(\frac{CU^2}{2}\right)_{\text{пред.}} = \frac{4lb^2d^2}{\pi D^2} \rho \xi. \quad (12)$$

Здесь ρ — удельное сопротивление плазмы разряда в импульсной лампе, приблизительно равное 0,02 ом·см, ξ — константа, несколько зависящая от структуры молибдена и колеблющаяся в пределах $4 \div 20 \cdot 10^7 \frac{\text{дж}}{\text{ом} \cdot \text{см}^4}$.

Эта формула, получение которой основывается на представлении о том, что ввод в лампу разрушается при рассеянии за время разряда в единице объема металла определенной критической энергии, позволила производить расчеты конструкции вводов самых различных кварцевых импульсных ламп.

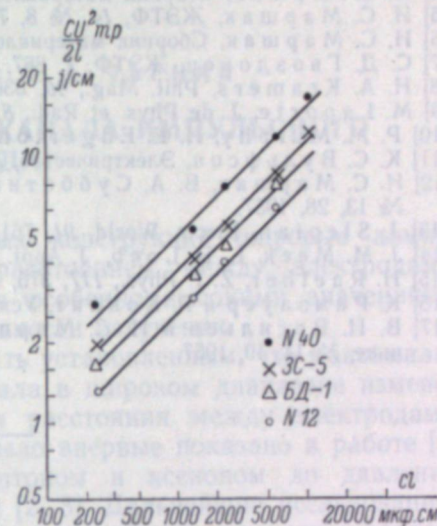


Рис. 8. Зависимость предельной нагрузки (в Дж на 1 см длины) прямых криптоновых ламп от произведения емкости питающего конденсатора на длину разрядной трубки, служащего мерой длительности разряда (четыре рецепта стекла, из которого изготовлялись лампы).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] И. С. Абрамсон, И. С. Маршак, ЖТФ, 12, № 10, 632, 1942.
- [2] И. С. Маршак, Электрический пробой газа при атмосферном давлении. Диссертация. МЭИ, 1946.
- [3] И. С. Маршак, Светотехника, № 1, 7, 1957; № 6, 22, 1957.
- [4] И. С. Маршак, Сборник материалов по вакуумной технике, № 9, 3, 1957.
- [5] И. С. Маршак, ЖЭТФ, 14, № 8, 703, 718, 1946.
- [6] И. С. Маршак, Сборник материалов по вакуумной технике, № 7, 3, 1955.
- [7] С. Д. Гвоздовер, ЖЭТФ, 7, 867, 1937.
- [8] H. A. Kramers, Phil. Mag., 46, 836, 1923.
- [9] M. Laporte, J. de Phys. et Rad., 8, 340, 1937.
- [10] P. M. Murphy, H. E. Edgerton, J. Appl. Phys., 12, 848, 1941.
- [11] К. С. Вульфсон, Электричество, № 11, 16, 1946.
- [12] И. С. Маршак, В. А. Субботин, Сборник материалов по вакуумной технике, № 13, 28, 1957.
- [13] J. Sierian, Electr. World, 91, 761, 1928.
- [14] J. M. Meek, L. B. Loeb, J. Appl. Phys., 11, 438, 459, 1940.
- [15] H. Raether, Z. f. Phys., 117, 375, 1941.
- [16] К. Рамзауер и Р. Коллат, Успехи физ. наук, 14, 157, 1934; 15, 128, 407, 1935.
- [17] В. И. Васильев и И. С. Маршак, Сборник материалов по вакуумной технике, № 14, 19, 1957.

К. С. ВУЛЬФСОН и Ф. А. ЧАРНАЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯРКОСТИ КАНАЛА ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА

Среди импульсных ламп различных конструкций шаровые лампы высокого давления ($1 \div 20$ ат) с расстоянием между электродами в несколько миллиметров отличаются особенно высокими значениями мгновенной яркости при малой длительности излучения.

Для ламп этого типа можно считать установленным, что максимальное значение мгновенной яркости канала в широком диапазоне изменения параметров разрядного контура и расстояния между электродами сохраняет постоянное значение. Это было впервые показано в работе [1] для ламп, наполненных аргоном, криптоном и ксеноном до давления около 4 ат, и подтверждено работами [2, 3]. Дальнейшие исследования, охватывающие более широкую область давлений и ряд неисследованных ранее газов, позволили значительно дополнить полученные ранее результаты.

Исследования производились в спектрально разложенном свете методом осциллографирования фототоков с последующим отбором осциллограмм, соответствующих центральной части канала. Методика измерений изложена в работе [2]. Измерения производились в области спектра от 0,4 до 1,0 мк. В основном исследовании производились при емкости разрядного конденсатора 0,2 мкф; величина индуктивности разрядного контура составляла при этом $0,8 \div 0,9$ мкн. Напряжение на конденсаторе могло быть доведено до 26 кв.

Путем сопоставления максимальных амплитуд осциллограмм, полученных при последовательном увеличении напряжения на конденсаторе, устанавливался электрический режим, начиная с которого максимальное значение спектральной плотности энергетической яркости $b_{\lambda \text{ max}}$ перестает возрастать и достигает, в известном смысле, насыщения. Сравнение яркости разных импульсных ламп проводилось в режимах, обеспечивающих насыщение $b_{\lambda \text{ max}}$.

Описанным методом было установлено, что $b_{\lambda \text{ max}}$ данной импульсной лампы в режиме насыщения не зависит ни от расстояния между электродами (для расстояний $1,5 \div 15$ мм), ни от емкости разрядного конденсатора (для $C = 0,05, 0,2$ и 4 мкф).

Результаты исследования в указанном режиме зависимости $b_{\lambda \text{ max}}$ от давления газа, полученной в режиме насыщения для импульсных ламп, наполненных ксеноном, криптоном, аргоном и кислородом до разного давления, представлены для $\lambda = 0,5$ мк на рис. 1 и для $\lambda = 0,9$ мк на рис. 2.

Из рассмотрения этих рисунков видно, что в режиме насыщения при достаточно большом давлении газа $b_{\lambda \text{ max}}$ перестает зависеть от давления, причем в длинноволновом излучении это имеет место при меньших давлениях, чем в коротковолновом.

Как показали проведенные исследования, $b_{\lambda \text{ max}}$ в указанном режиме возрастает с уменьшением атомного веса газа. Это обстоятельство побудило провести исследования яркости канала в более легких газах.

Результаты исследования зависимости $b_{\lambda \text{ max}}$ от напряжения на конденсаторе для импульсных ламп, наполненных азотом, неоном и гелием до давления около 2 ат, представлены для $\lambda = 0,5$ мк на рис. 3 и для $\lambda = 0,9$ мк на рис. 4. Из сравнения этих рисунков следует, что характер

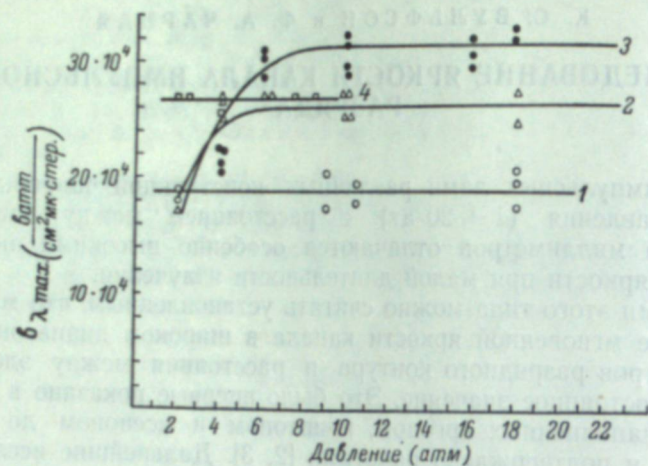


Рис. 1.

1 — ксенон, 2 — криптон, 3 — аргон, 4 — кислород.

полученных кривых существенно зависит от длины волны: в длинноволновом излучении $b_{\lambda \text{ max}}$ достигает насыщения при меньших напряжениях. Для импульсных ламп, наполненных азотом и неоном, насыщение $b_{\lambda \text{ max}}$ удалось получить не во всей исследованной области спектра, а только для излучения с длиной волны более $0,7 \div 0,8$ мк. Для импульсных ламп, наполненных гелием, насыщение $b_{\lambda \text{ max}}$ в настоящей схеме ни в одной длине волны получить не удалось. Вопрос о том, какова величина ярко-

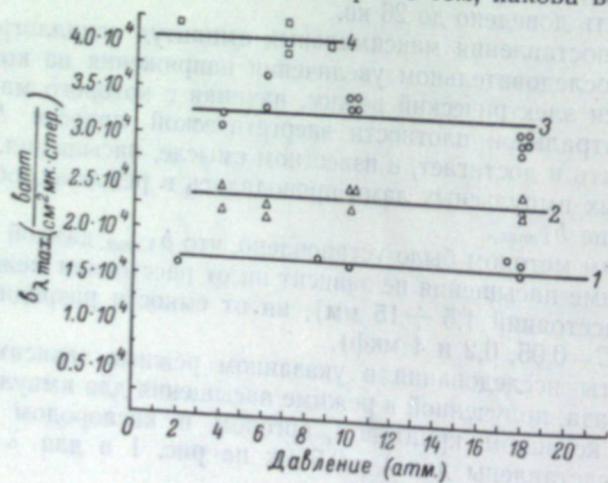


Рис. 2.

1 — ксенон, 2 — криптон, 3 — аргон, 4 — кислород.

сти, которой можно достичь в гелиевых лампах, и имеет ли эта яркость насыщение, требует дальнейших исследований.

Из рис. 1—4 видно, что из исследованных ламп наибольшим значением $b_{\lambda \text{ max}}$ обладают азотные импульсные лампы, которые в соответствии с данными [2] характеризуются значительно меньшей длительностью излучения, чем лампы, наполненные аргоном (рис. 5).

Необходимо отметить, что ввиду того, что неоновые и гелиевые лампы имеют низкое пробивное напряжение (менее 1 кв), в разрядный контур последовательно с исследуемой лампой включалась управляющая импульсная лампа. Это давало возможность поднять напряжение на конденсаторе значительно выше пробивного напряжения лампы.

Хотя физические процессы, ограничивающие рост яркости, в настоящее время еще полностью не выяснены, полученные экспериментальные результаты можно объяснить, исходя из оптических свойств плазмы разряда.

Так как по мере увеличения плотности энергии, вводимой в канал разряда, температура канала возрастает до десятков тысяч градусов, то коэффициент поглощения плазмы, являющийся функцией температуры, достигает весьма больших значений. Дальнейшее повышение температуры в центральной области канала не может вызвать увеличения яркости, поскольку излучение внутренних, бо-

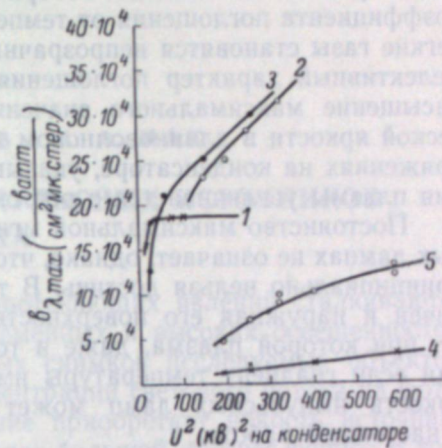


Рис. 3.

$C = 0,2$ мкф. 1 — ксенон (2 ат), 2 — азот (2 ат), 3 — азот (3 ат), 4 — гелий (2 ат), 5 — неон (2 ат).

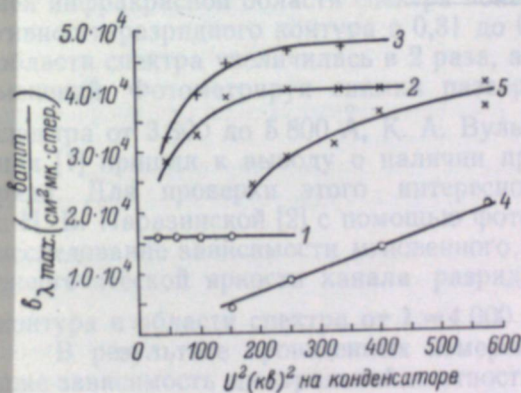


Рис. 4.

$C = 0,2$ мкф. 1 — ксенон (2 ат), 2 — азот (2 ат), 3 — азот (3 ат), 4 — гелий (2 ат), 5 — неон (2 ат).

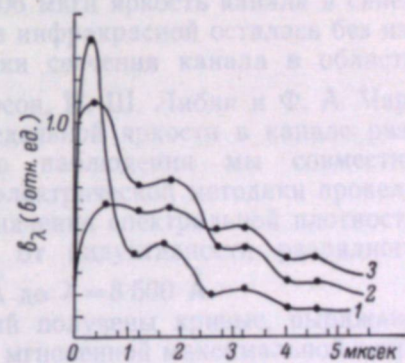


Рис. 5. Временной ход спектральной плотности энергетической яркости импульсных ламп.

Длина волны 0,9 мк. $C = 0,2$ мкф. 1 — азот (2 ат, $V = 16$ кв), 2 — аргон (4 ат, $U = 10$ кв), 2 — ксенон (2 ат, $U = 10$ кв).

лее горячих слоев поглотится в окружающем слое непрозрачной плазмы. Экспериментально наблюдаемая яркость определяется излучением слоев газа, имеющих температуру, близкую к той, при которой плазма становится непрозрачной.

С этой точки зрения величина яркости в режиме насыщения не должна зависеть ни от электрических параметров разрядного контура, ни

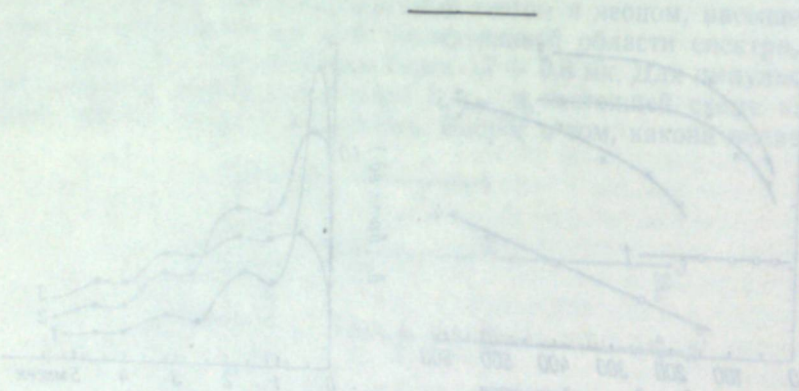
от расстояния между электродами, а будет определяться температурой при которой коэффициент поглощения достигает достаточно больших значений, и градиентом температуры в направлении радиуса канала.

Различие в величине максимальной мгновенной яркости канала разряда в разных газах может говорить о том, что в этих газах зависимость коэффициента поглощения от температуры имеет разный характер; более легкие газы становятся непрозрачными при более высоких температурах. Селективный характер поглощения плазмы, выражающийся в том, что насыщение максимального значения спектральной плотности энергетической яркости в длинноволновом излучении наступает при меньших напряжениях на конденсаторе, указывает на то, что коэффициент поглощения плазмы увеличивается с ростом длины волны.

Постоянство максимальной мгновенной яркости в шаровых импульсных лампах не означает, однако, что более высокой яркости в данном газе принципиально нельзя достичь. В том случае, когда объем канала ограничен и наружная его поверхность имеет температуру, превосходящую или если градиент температуры имеет существенно большее значение яркость импульсных ламп может превосходить значение, полученное в настоящей работе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] К. С. Вульфсон, И. Ш. Либин, Ф. А. Чарная, Изв. АН СССР, сер. физ. 19, 61, 1955.
 [2] Ф. А. Чарная, Оптика и спектроскопия, 1, № 7, 857, 1956.
 [3] М. П. Ванюков, А. А. Мак, Н. В. Паразинская, Оптика и спектроскопия 1, № 5, 642, 1956.



М. П. ВАНЮКОВ и А. А. МАК ЯРКОСТЬ НЕКОТОРЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

При фотографировании быстро протекающих явлений сталкиваются с необходимостью создания кратковременных и высоких освещенностей, обеспечивающих получение отчетливых снимков исследуемых объектов. В случае применения оптики для концентрации светового потока на фотографируемый объект большое значение приобретает яркость источника света. С этой точки зрения представляет большой интерес вопрос о том, какие яркости можно получить с помощью импульсных ламп высокого давления, искровой разряд в которых обеспечивает высокую концентрацию энергии в канале разряда. При этом плотность энергии, выделяющейся в канале, определяется в первую очередь величинами напряжения, при котором происходит разряд, индуктивности разрядного контура и давления газа в лампе.

Первые опыты, проведенные нами в 1953—1954 гг., по измерению яркости канала импульсных ламп высокого давления в видимой и ближней инфракрасной области спектра показали, что при уменьшении индуктивности разрядного контура с 0,31 до 0,06 мкГн яркость канала в синей области спектра увеличилась в 2 раза, а в инфракрасной осталась без изменений. Фотометрируя снимки развертки свечения канала в области спектра от 3 800 до 5 800 Å, К. А. Вульфсон, И. Ш. Либин и Ф. А. Чарная [1] пришли к выводу о наличии предельной яркости в канале разряда. Для проверки этого интересного наблюдения мы совместно с Н. В. Паразинской [2] с помощью фотоэлектрической методики провели исследование зависимости мгновенного значения спектральной плотности энергетической яркости канала разряда от индуктивности разрядного контура в области спектра от $\lambda = 4\,000 \text{ Å}$ до $\lambda = 8\,500 \text{ Å}$.

В результате проведенных измерений получены кривые, выражающие зависимость спектральной плотности мгновенной максимальной энергетической яркости канала b_λ от длины волны для различных значений индуктивности разрядного контура и различных моментов времени. Для примера на рис. 1 представлена зависимость спектральной плотности яркости от длины волны для разряда в аргоне при $L = 0,12 \text{ мкГн}$, $U = 12 \text{ кВ}$ и $C = 0,011 \text{ мкФ}$ для различных моментов времени от 0,1 до 0,4 мксек. Прерывистыми линиями нанесен ход излучения черного тела при температурах, определяемых яркостными температурами, вычисленными по значениям спектральной плотности яркости для $\lambda = 4\,680 \text{ Å}$ в случае разряда в аргоне и для $\lambda = 4\,490 \text{ Å}$ — в ксеноне.

На рис. 2 и 3 представлена зависимость величины b_λ (макс) от индуктивности разрядного контура L для излучения в различных областях

спектра для разряда в аргоне и ксеноне. В аргоне наблюдается увеличение яркости почти во всей обследованной области спектра при уменьшении индуктивности разрядного контура, однако эта зависимость наиболее сильно сказывается в коротковолновой части спектра. В ксеноне вели-

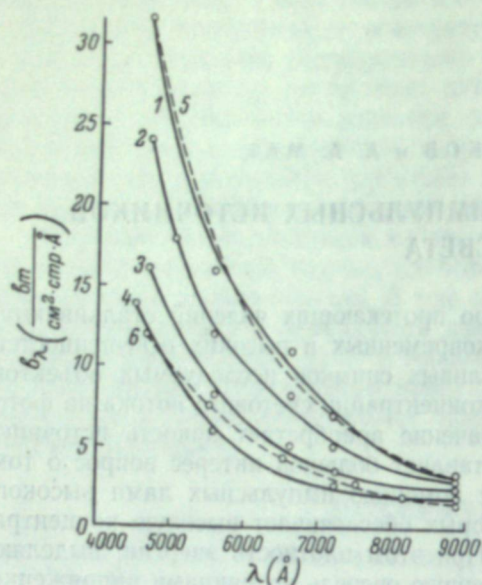


Рис. 1. Зависимость спектральной плотности яркости b_λ канала разряда в аргоне и черного тела от длины волны.
1 — 0,1, 2 — 0,2, 3 — 0,3, 4 — 0,4 мксек., 5 — ход излучения черного тела при яркостной температуре 31 000° К, 6 — то же, при 18 500° К.

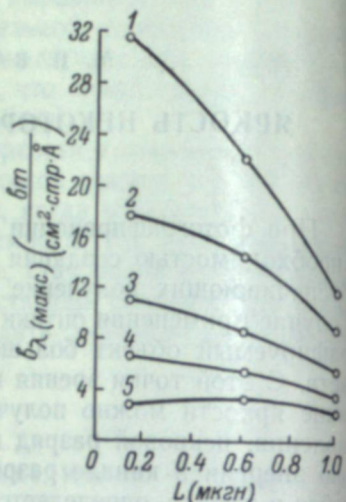


Рис. 2. Зависимость $b_\lambda(\text{макс})$ канала разряда в аргоне от индуктивности разрядного контура для различных длин волн.
1 — 4680, 2 — 5540, 3 — 6520, 4 — 7290, 5 — 8870 А.

чина b_λ остается неизменной при уменьшении индуктивности разрядного контура во всей обследованной области спектра.

Приведенные графики показывают, что насыщение яркости в длинноволновой части обследованного спектра наступает при меньших индуктивностях, чем в коротковолновой.

Кривые, представленные на рис. 1, позволяют рассчитать эффективную яркость для различных селективных приемников излучения (фотопластинка, фотоэлемент, глаз и т. д.). В качестве примера на рис. 4 приводятся зависимости световой яркости канала разряда импульсной лампы, выраженной в стильбах, от значения индуктивности разрядного контура, выраженной в микрогенри.

Разряд в ксеноне характеризуется практически неизменной максимальной яркостью порядка $11 \cdot 10^6$ сб. В этих же условиях разряд в аргоне показывает значительное увеличение яркости при уменьшении индуктивности разрядной цепи.

При разряде в ксеноне максимальная яркостная температура составляет 27 000° К, а при разряде в аргоне — 31 000° К.

В настоящее время еще не представляется возможным дать строгое физическое обоснование явлению насыщения яркости. Можно предположить, однако, что в этом вопросе играют существенную роль два фактора. Один из них заключается в том, что при увеличении скорости поступления энергии в искровой промежуток должна увеличиваться скорость рас-

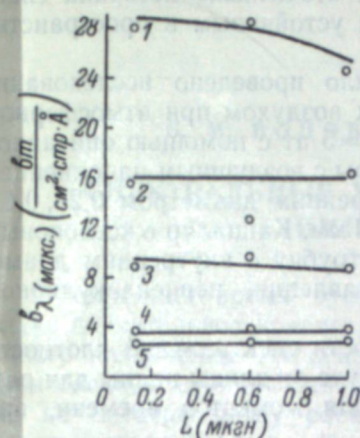


Рис. 3. Зависимость $b_\lambda(\text{макс})$ канала разряда в ксеноне от индуктивности разрядного контура для различных длин волн.
1 — 4490, 2 — 5500, 3 — 6450, 4 — 8600, 5 — 7900 А.

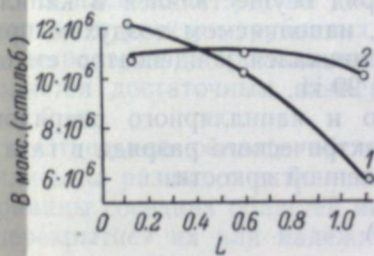


Рис. 4. Зависимость максимальной мгновенной световой яркости канала разряда в аргоне (кривая 1) и ксеноне (кривая 2) от индуктивности разрядного контура.

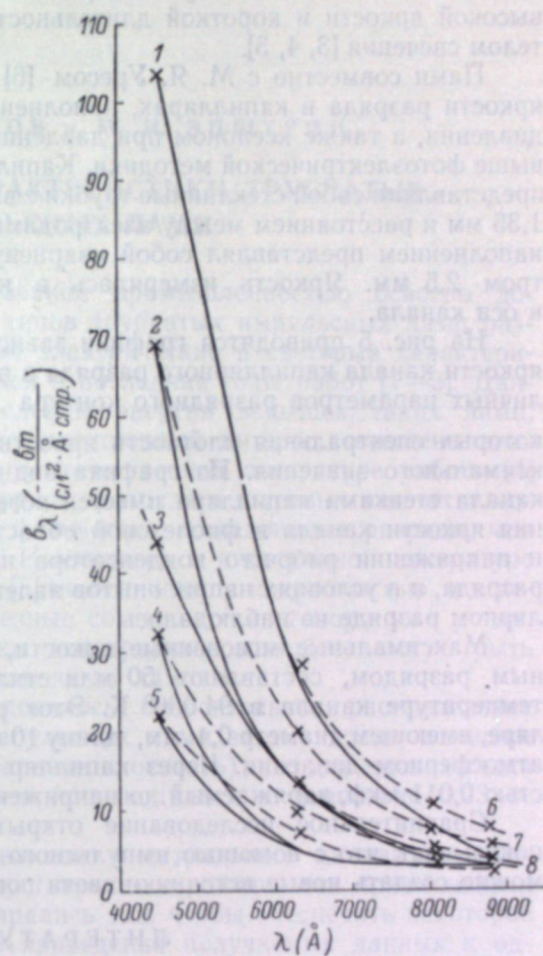


Рис. 5. Зависимость b_λ канала капиллярного и неограниченного искрового разряда (воздух, $U=12$ кв, $l=10$ мм) и черного тела от длины волны.
1 — $c=0.51$ мкф, $d=1.3$ мм, $t=0.5$ мксек; 2 — $c=0.01$ мкф, $d=0.4$ мм, $t=0.01$ мксек; 3 — $c=0.01$ мкф, $d=0.25$ мм, $t=0.1$ мксек; 4 — $c=0.01$ мкф, $d=1.3$ мм, $t=0.1$ мксек; 5 — $c=0.01$ мкф, $t=0.1$ мксек; 6 — 64 000° К; 7 — 45 000° К; 8 — 36 000° К.

пературной частью плазмы и окружающим плазму холодным газом. Этот переходный слой может сильно поглощать радиацию высокотемпературной части канала и вызывать тем самым понижение его яркости.

Задача создания источника света с максимально высокой яркостью сводится поэтому к тому, чтобы создать такие условия разряда, при которых переход от высокотемпературной части разряда к окружающему холодному газу осуществлялся бы по возможности в тонком слое, обладающем большим градиентом температуры и, кроме того, была бы ограничена возможность расширения токопроводящего канала. Одним из воз-

можных путей создания указанных выше условий может быть ограничены разрядом стенками капилляра. Такой разряд представляет большой интерес в качестве источника света для скоростного фотографирования так как он позволяет получить практически «точечный» источник свет высокой яркости и короткой длительности с устойчивым в пространстве телом свечения [3, 4, 5].

Нами совместно с М. Я. Уресом [6] было проведено исследование яркости разряда в капиллярах, наполненных воздухом при атмосферном давлении, а также ксеноном при давлении $p=5$ ат с помощью описанной выше фотоэлектрической методики. Капилляры с воздушным наполнением представляли собой стеклянные трубки с внутренним диаметром 0,25, 0,4, 1,35 мм и расстоянием между электродами 10 мм. Капилляр с ксеноновым наполнением представлял собой кварцевую трубку с внутренним диаметром 2,5 мм. Яркость измерялась в направлении, перпендикулярно к оси канала.

На рис. 5 приводятся графики зависимости спектральной плотности яркости канала капиллярного разряда в воздухе от длины волны для различных параметров разрядного контура и для моментов времени, при которых спектральная плотность яркости для $\lambda = 4494 \text{ \AA}$ достигает максимального значения. Из графика видно, что с помощью ограничения яркости канала в фиолетовой области спектра. Увеличение емкости и напряжения рабочего конденсатора приводит к повышению яркости разряда, и в условиях наших опытов явления насыщения яркости в капиллярном разряде не наблюдалось.

Максимальные мгновенные яркости, достигнутые нами с капиллярным разрядом, составляют 50 млн стильб, соответствующие яркостной температуре канала в $94\,000^\circ \text{K}$. Этот разряд осуществлялся в капилляре, имеющем диаметр 0,4 мм, длину 10 мм, наполняемом воздухом при атмосферном давлении. Через капилляр разряжался конденсатор емкостью 0,011 мкф, заряжаемый до напряжения 29 кв.

Сравнительное исследование открытого и капиллярного разряда показывает, что с помощью импульсного электрического разряда в газе можно создать новые источники света повышенной яркости.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] К. С. Вульфсон, И. Ш. Либин, Ф. А. Чарная, Изв. АН СССР, сер. физ. 19, № 1, 61, 1955.
- [2] М. П. Ванюков, А. А. Мак и Н. В. Паразинская, Оптика и спектроскопия, 1, 642, 1956.
- [3] P. Fayolle and P. Naslin, J. Mot. Pict. Telev. Engrs., 60, 603, 1953.
- [4] М. П. Ванюков, ЖТФ, 16, № 8, 889, 1946.
- [5] J. A. Fitzpatrick, J. C. Hubbard and W. J. Thaler, J. Appl. Phys., 21, 1268, 1950.
- [6] М. П. Ванюков, А. А. Мак и М. Я. Урес. Оптика и спектроскопия, 4, 90, 1958.

Б. М. ВОДОВАТОВ и М. И. ЭПШТЕЙН

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБЧАТЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП

В настоящее время отечественной промышленностью освоено довольно значительное количество типов трубчатых импульсных ламп различного назначения. Их основные электрические и световые характеристики описаны в ряде появившихся в последние годы работ [1—3]. Данные по спектральному распределению энергии вспышек таких ламп, представляющие в ряде случаев существенный интерес, освещены значительно хуже. Опубликованные в отечественной литературе работы [4] касаются только высокотемпературного разряда в шаровых лампах и могут рассматриваться скорее как физические исследования разряда, чем как технические характеристики. Имеющиеся в иностранной литературе сведения технического характера [5] не отличаются подробностью, а в некоторых случаях вызывают серьезные сомнения,¹ не говоря уже о том, что спектральные характеристики иностранных ламп не могут быть в полной мере отнесены к отечественным лампам.

В настоящей работе исследовалось относительное распределение энергии в спектре трубчатых импульсных ламп за все время вспышки (интегральная по времени спектральная плотность), что для многих задач является достаточным. Измерения производились в диапазоне $0,23 \div 1,2$ мк.

Отдельные области обследованного спектрального диапазона изменялись на разных спектральных установках с различными приемниками. Границы соседних областей выбирались так, чтобы обеспечить некоторое «перекрывание» их для надежного приведения получаемых данных к одному масштабу.

1. Измерительные установки

В видимой области спектра измерения производились на отечественном стеклянном монохроматоре однократного разложения типа УМ-2. Приемником энергии служил фотоэлектронный умножитель фирмы RCA с вислоцеэиевым катодом IP-22. Чувствительность системы «монохроматор-умножитель» определялась путем измерения излучения ламп, имеющих известное распределение энергии в спектре. В качестве таких эталонных источников света использовались светоизмерительные лампы калибровки направленной силы света, спектральное распределение которых было измерено в фотометрической лаборатории ВНИИМ. Всего для калибровки было использовано 4 лампы.

¹ В работе [6] автор приводит весьма приближенную кривую спектрального распределения излучения импульсной лампы, снабженную абсолютным масштабом по оси ординат. Из этой кривой следует, что излучаемая лампой за время одной вспышки энергия только в диапазоне $0,3 \div 1$ мк примерно в 3 раза превышает энергию, запасенную конденсатором.

Щель монохроматора как при калибровочных измерениях, так и в последующих измерениях импульсных ламп освещалась пластинкой с испаленной окисью магния, отражавшей свет измерявшихся ламп (за исключением, которое будет оговорено ниже). Такие условия обеспечивают равномерное заполнение коллиматора излучением от всех частей светящегося тела лампы и соответствуют условиям, в которых производилась калибровка ламп в ВНИИМ.

Калибровочные данные были получены в диапазоне спектра от 0,36 до 0,8 мк. В области длин волн $0,36 \div 0,46$ мк калибровка производилась через 50 \AA ; в области $0,46 \div 0,8$ мк — через 100 \AA . Границы этого диапазона определяются, с одной стороны, поглощением оптики монохроматора, с другой — чувствительностью висмутосезиевого катода.

Для устранения влияния рассеянного света в области $0,36 \div 0,46$ мк перед входной щелью монохроматора устанавливались фильтры ФФ-2 (2 мм) и СЗС14 (2 мм), срезающие основную часть видимой области и практически всю инфракрасную область спектра.

Для измерений в близкой инфракрасной области на том же монохроматоре УМ-2 умножитель IP-22 заменялся отечественным умножителем с кислородно-сезиевым катодом ФЭУ-22. Экстраполяция излучения эталонных ламп для этой области по данным видимого участка спектра требует учета селективности излучения вольфрама. Ввиду того, что у этой селективности для спирального тела накала светонизмерительных ламп затруднителен, были взяты 3 лампы с телом накала в виде плотной конической спирали (типа СЦ62). Использовалось излучение лампы с внутренней поверхности конуса. Кривая излучения этих ламп была тщательно определена в видимой области спектра путем сравнения с эталонными лампами (по семи ординатам в диапазоне $0,4 \div 0,7$ мк), а затем экстраполирована до 1,2 мк.

Уже обычная спирализация вольфрама приводит, как известно, к существенному «почернению» излучения. В нашем случае при использовании излучения только внутренних поверхностей тела накала это отклонение может составлять лишь небольшую долю от приведенных значений.

В ультрафиолетовой области измерения проводились на двойном кварцевом монохроматоре фирмы «Zeiss». Прибор состоит из двух линейных монохроматоров с призмами прямого отклонения, сочлененных по схеме удвоения дисперсии.

Приемником служил умножитель IP-28 фирмы RCA с сурьмяно-сезиевым катодом в увиолевой колбе. Калибровка установки производилась по двум экземплярам UV-нормали, каждый из которых был измерен по 4 раза.

Ширина входной щели монохроматора бралась равной 0,04 мм, средняя щель устанавливалась на основании предварительных измерений с таким расчетом, чтобы выходила практически полная энергия данной линии или группы линий (для части линий — 0,26 мм и для остальных — 0,32 мм). Ширина выходной щели составляла 1,5 мм. При такой ширине через нее проходит с некоторым запасом весь спектральный интервал пропущенной средней щелью.¹

¹ При измерениях на этом монохроматоре ширина средней щели устанавливалась нами во всех случаях не более $0,4 \div 0,45$ мм; ее изображение в плоскости выходной щели имеет ширину соответственно не более 0,9 мм (за счет удвоения дисперсии). Однако необходим «запас» ширины, так как за счет дефектов механической обработки в приборе поворот второй призмы не строго соответствует повороту первой, что приводит к небольшим смещениям изображения в плоскости выходной щели. Ширина 1,5 мм оказалась достаточной при всех положениях призм.

Как известно, чувствительность фотокатодов вдоль их поверхности неоднородна. Поэтому при всех измерениях было обеспечено точно воспроизводимое положение умножителей, выбранное таким образом, что выходящий из щели поток заполнял большую часть поверхности катода. Ток умножителей измерялся зеркальными гальванометрами ГЭС-47, установленными на платформе пружинного подвеса с масляным успокоителем. Чувствительность гальванометров при выбранных расстояниях до катода была около $1,5 \cdot 10^{-10}$ а/мм. К гальванометрам подключались магнитоэлектрические компенсаторы нуля, состоящие из батареи от карманного фонаря, высокоомного сопротивления и потенциометров грубой плавной регулировки.

Питание умножителей обеспечивалось стабилизированными выпрямителями с регулируемым напряжением, что давало возможность в очень широких пределах регулировать чувствительность системы.

Применение высокочувствительных гальванометров позволило работать с малыми потоками, что обеспечило линейность измерений в широком диапазоне режимов работы умножителей. Линейность системы была проверена с помощью ряда нейтральных фильтров различной плотности, измеренных предварительно на спектрофотометрах СФ-11, СФ-4 и СФ-2М. Она проверялась также во всем диапазоне напряжений, подаваемых на умножители и в различных областях спектра. При этом не было обнаружено отклонений от линейности, выходящих за пределы точности отсчетов.

2. Измерение излучения импульсных ламп

Все описанные ниже измерения спектров импульсных ламп производились на ряде последовательных вспышек. При измерениях использовались те же гальванометры ГЭС-47, работавшие в этом случае в баллистическом режиме. Линейность работы системы в импульсном режиме была дополнительно проверена с помощью тех же фильтров, при последовательных вспышках с фильтром и без него.

При условии полной зарядки питающего лампы конденсатора световая вспышка трубчатых импульсных ламп оказывается постоянной высокой степенью точности, вполне сравнимой с точностью, обеспечиваемой хорошо стабилизированными источниками непрерывного горения. Все точки полученных кривых измерялись не менее двух раз, при этом разница между отсчетами, соответствующими одним и тем же длинам волн, в большинстве случаев не превышала 1—2%. Исключения составляли отсчеты, полученные при съемке особенно крутых фронтов спектральных линий (до 10% и несколько больше), что объясняется неточностью при установке длины волны.

Зарядка конденсатора, питающего лампы, производилась мощным выпрямителем, восстанавливавшим напряжение на конденсаторе за несколько секунд.

Для детального ознакомления с характером спектра для лампы ИФК-120 была снята подробная кривая в интервале $0,225 \div 1,2$ мк. Для измерений в ультрафиолетовой области использовалась специально изготовленная лампа в увиолевом стекле.

Для области короче 0,33 мк, где начинает падать пропускание увиолевого стекла, излучение лампы было пересчитано на истинное по кривой пропускания данной варки стекла, пересчитанной на толщину 0,9 мм (приблизительная толщина стенок колбы).

Режим питания лампы был выбран таким образом, чтобы за время измерений не происходило заметного старения лампы (емкость 730 мкФ, напряжение 300 в, энергия вспышки 33 дж).

Измерения производились через каждый градус барабана длин волн при очень узких входных и выходных щелях: в видимой области — 0,05 мм, в инфракрасной — 0,04 мм, в ультрафиолетовой (кварцевый монохроматор) — 0,03 мм. Это соответствует спектральным интервалам 2 \AA для $\lambda = 2500 \text{ \AA}$; 6 \AA для 3500 \AA и 5000 \AA ; 18 \AA для 7000 \AA ; 29 \AA для 9000 \AA ; 47 \AA для 11000 \AA . В инфракрасной области в связи с низкой чувствительностью кислородноцезиевого умножителя щель освещалась с помощью конденсора, отображавшего на щель центральную часть лампы. Пропускание конденсора было определено специальными измерениями и оказалось в этой области спектра постоянным.

Полученная кривая, содержащая свыше 2200 дважды измеренных точек (не считая точек перехлеста), представлена на рис. 1 и 2.

Дальнейшие измерения производились другим, менее трудоемким более точным путем.

Наличие большого числа близко расположенных линий делает затруднительным раздельное измерение линий и фона, как это бывает, например, при измерениях излучения люминесцентных ламп. Поэтому был выбран следующий способ съемки спектров. При узкой входной щели (порядка 0,05 мм) устанавливалась широкая выходная щель. Спектр перемещался каждый раз на расстояние, в точности равное ширине входной щели. Результаты таких измерений дают средние значения спектральной плотности для узких участков спектра, постепенно расширяющихся с увеличением длины волны. Ширина выходной щели была выбрана для области $0,36 \div 0,82 \text{ мк}$ равной 1 мм, для области $0,715 \div 1,2 \text{ мк}$ — 0,5 мм, для ультрафиолетового участка $0,23 \div 0,43 \text{ мк}$ (в кварцевом монохроматоре) оказалась удобной величина 0,423 мм.

Положение первого (в каждой отдельно измерявшейся области участка на шкале длин волн выбиралось так, чтобы границы между смежными участками на всем протяжении области не попадали на места крутых фронтов. В противном случае незначительные неточности в установке барабана длин волн могут привести к существенным погрешностям. Такая разбивка на участки была сделана при помощи полученной ранее подробной кривой (на рис. 1 и 2 показана прерывистой линией). Этим способом были проделаны следующие измерения:

1. Проведено измерение излучения 5 экземпляров ламп ИФК-1 (в ультрафиолетовой области на кварцевом монохроматоре — 4 лампы в примерно номинальном режиме. Эти измерения позволили оценить стабильность излучательных характеристик ламп. Емкость конденсатора составляла 2430 мкФ, напряжение — 300 в (энергия вспышки 109 дж). Данные по излучению в ультрафиолетовой области, не пропускаемому обычным стеклом, были получены на упоминавшейся выше лампе в увиолевым стекле. Спектральная плотность излучения участка спектра $4660 \div 4750 \text{ \AA}$, максимальная в видимой области, была принята, как и в приводимых ниже данных, за 100.¹ Разброс значений спектральной плотности остальных участков составил при этом 2—4% от среднего значения для данного участка.

¹ Такой выбор масштаба является, разумеется, произвольным, но полученные результаты без труда приводятся к абсолютным значениям в единицах энергии излучения, освещивания или количества освещения по имеющимся интегральным (по спектру) данным.

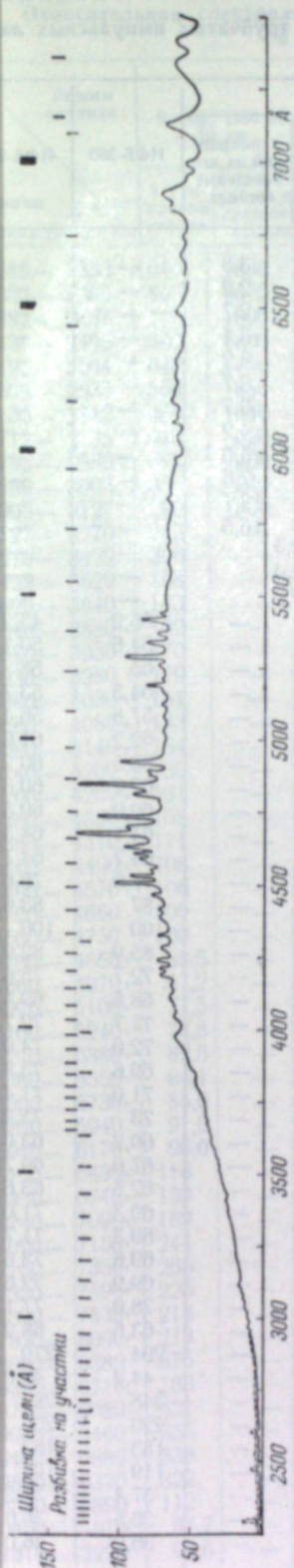


Рис. 1. Спектр излучения лампы ИФК-120 в увиолевом стекле (емкость 730 мкФ, напряжение 300 в) в диапазоне 2250—7500 Å. Пунктиром показана кривая, исправленная на поглощение в увиолевом стекле.

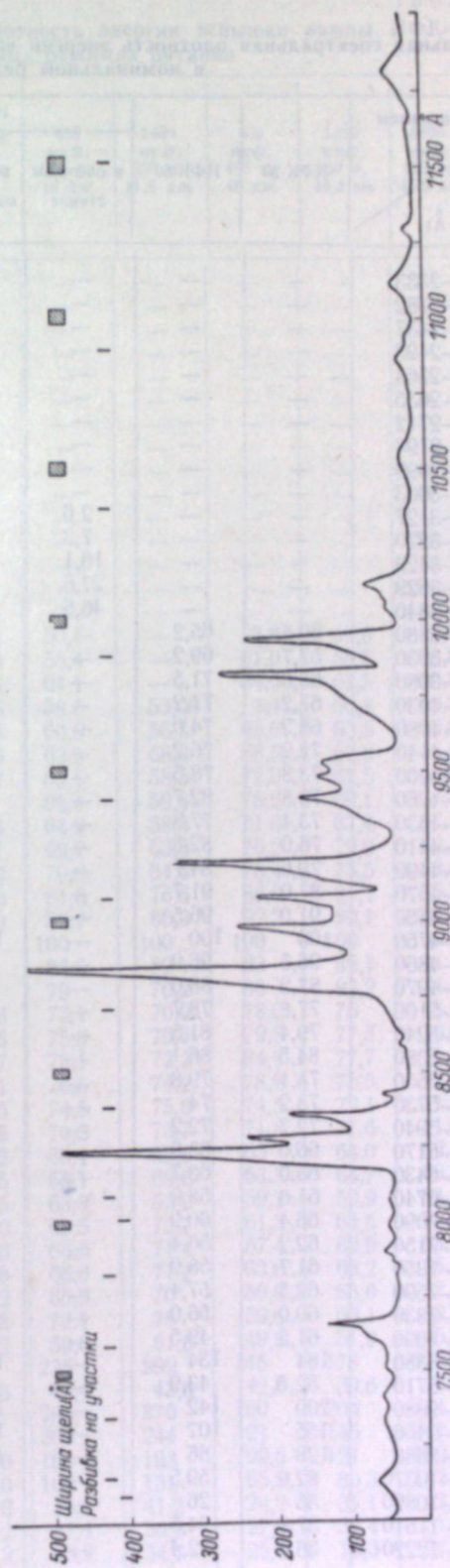


Рис. 2. Спектр излучения лампы ИФК-120 в диапазоне 7000—12000 Å (продолжение кривой рис. 1). Спектральная плотность в тех же единицах, что и на рис. 1, но масштаб по оси ординат сокращен вдвое.

Таблица

Относительная спектральная плотность энергии вспышки трубчатых импульсных ламп в номинальном режиме

Тип лампы Границы участков (в Å)	ИФК-120					ИФБ-300	ИФК-50
	ИФК-20	ИФК-50	в обычном стекле	в увиоле-вом стекле	с поправ-кой на по-глощение стекла		
2285—2333	—	—	—	1,2	3,3	—	—
2333—2382	—	—	—	1,0	2,2	—	—
2382—2437	—	—	—	1,3	2,7	—	—
2437—2493	—	—	—	1,8	3,4	—	—
2493—2564	—	—	—	1,8	3,2	—	—
2564—2635	—	—	—	2,5	3,7	—	—
2635—2712	—	—	—	2,8	3,7	—	—
2712—2798	—	—	—	3,5	4,2	—	—
2798—2899	—	—	—	4,5	5,0	—	—
2889—3003	—	—	—	7,3	7,6	—	—
3003—3127	—	—	2,6	12,5	12,7	—	—
3127—3270	—	—	7,3	16,4	16,5	—	—
3270—3429	—	—	16,1	—	22,3	—	—
3429—3629	—	—	27,6	—	32,3	—	—
3629—3840	—	—	46,6	—	49,2	—	—
3840—3880	60,5	65,2	—	61,6	—	55,2	45,2
3880—3930	57,7	69,2	—	64,1	—	54,6	50,1
3930—3980	65,6	71,5	—	66,2	—	65	58
3980—4030	67,2	71,2	—	66,4	—	54,3	53,7
4030—4080	68,2	74,0	—	69,1	—	57,8	56,4
4080—4140	71,2	76,2	—	71,7	—	62,2	61,6
4140—4200	73,8	78,5	—	71,6	—	63,5	60,2
4200—4260	79,8	82,7	—	75,8	—	62,7	60,6
4260—4330	73,4	77,8	—	73,2	—	60,0	60,5
4330—4410	76,0	82,8	—	76,9	—	64,7	64,5
4410—4490	79,6	84,7	—	79,1	—	64,7	64,1
4490—4570	87,0	91,7	—	86,9	—	77,0	75,6
4570—4660	91,0	96,5	—	91,9	—	87	83,6
4660—4750	100	100	—	100	—	100	100
4750—4860	96,5	96,9	—	91,5	—	85,0	82,0
4860—4970	87,2	88,0	—	84,4	—	72,7	75,6
4970—5100	77,8	78,7	—	76,1	—	68,5	69,5
5100—5240	79,4	81,5	—	78,5	—	71,7	72,7
5240—5380	84,5	86,1	—	81,0	—	72,0	74,0
5380—5550	78,1	79,8	—	77,7	—	69,6	73,8
5550—5730	73,2	74	—	72,9	—	71,0	71,4
5730—5940	72,7	72,2	—	71,8	—	73	73,3
5940—6170	66,0	65,8	—	63	—	60,2	63,0
6170—6430	65,0	63,7	—	63,4	—	67,0	69,7
6430—6740	61,0	58,9	—	58,2	—	62,5	65,6
6740—7090	66,4	60,9	—	62,3	—	69,3	71,0
7090—7150	62,2	56,4	—	58,1	—	69,3	71,7
7150—7350	61,7	58,9	—	61,5	—	69,6	73,6
7350—7590	62,5	57,4	—	58,6	—	69,9	72,6
7590—7830	60,0	56,0	—	59,5	—	78,0	77,1
7830—8090	61,5	49,5	—	50	—	63,6	68,2
8090—8380	184	134	—	155	—	294	270
8380—8710	52,5	43,9	—	39,4	—	44,2	46,0
8710—9080	209	142	—	170	—	348	284
9080—9460	155	107	—	129	—	220	206
9460—9880	128	86	—	105	—	183	162
9880—10370	82,6	59,5	—	73,0	—	119	104
10370—10890	35	26	—	28,6	—	37,4	37,2
10890—11510	37,8	24,5	—	28,8	—	36,5	36,0
11510—12220	36,8	22,4	—	18,8	—	36,0	36,0

Таблица 2

Относительная спектральная плотность энергии вспышки лампы ИФК-120 в различных режимах питания

Режим питания Границы участков (в Å)	8 мкФ, 1580 в, 10 дж		90 мкФ, 500 в, 11,2 дж	435 мкФ, 283 в, 18 дж	1480 мкФ, 125 в, 11,5 дж	435 мкФ, 455 в, 45 дж	1480 мкФ, 250 в, 46,2 дж	5800 мкФ, 125 в, 45,3 дж	5800 мкФ, 250 в, 181 дж
	в увиоле-вом стекле	с поправ-кой на по-глощение стекла							
2285—2333	1040	2800	—	—	—	—	—	—	—
2333—2382	840	2000	—	—	—	—	—	—	—
2382—2437	770	1600	—	—	—	—	—	—	—
2437—2493	690	1300	—	—	—	—	—	—	—
2493—2564	640	1100	—	—	—	—	—	—	—
2564—2635	550	830	—	—	—	—	—	—	—
2635—2712	480	640	—	—	—	—	—	—	—
2712—2798	440	520	—	—	—	—	—	—	—
2798—2889	390	430	—	—	—	—	—	—	—
2889—3003	330	340	—	—	—	—	—	—	—
3003—3127	290	300	—	—	—	—	—	—	—
3127—3270	245	—	—	—	—	—	—	—	—
3270—3429	206	—	—	—	—	—	—	—	—
3429—3629	168	—	—	—	—	—	—	—	—
3629—3840	143	—	—	—	—	—	—	—	—
3840—3880	182	—	64,5	50,1	—	55,8	53,6	44,0	55,6
3880—3930	170	—	74,0	55,4	—	61,0	58,8	48,8	60,0
3930—3980	179	—	76,8	61,1	—	64,0	62,5	56,5	64,0
3980—4030	151	—	76,5	58,0	53,06	3,4	60,8	49,9	62,0
4030—4080	143	—	83,4	60,9	56,7	66,6	63,5	53,0	64,5
4080—4140	134	—	83,6	63,9	58,8	68,5	65,8	56,6	67,1
4140—4200	130	—	92,7	65,1	58,5	72,0	67,5	57,2	67,5
4200—4260	131	—	110	66,4	59,8	76,2	69,1	57,3	69,5
4260—4330	108	—	73,4	64,9	58,3	71,6	67,4	57,5	68,8
4330—4410	111	—	81,1	69,7	63,8	76,2	72,0	62,8	73,1
4410—4490	108	—	88,9	70,0	64,6	78,4	73,5	63,2	74,5
4490—4570	106	—	90,0	81,0	76,6	86,0	81,1	75,1	79,4
4570—4660	100	—	98,0	88,7	86,3	92,2	89,1	84,6	88,5
4660—4750	100	—	100	100	100	100	100	100	100
4750—4860	88,6	—	101	86,5	82	93	89,1	81	87,6
4860—4970	87,2	—	94	79	76,2	88	83,2	74,1	82,1
4970—5100	77,5	—	79,6	73,1	70,0	78,0	75	68,6	76,0
5100—5240	78,8	—	79,6	75,0	76,5	79,5	77,3	70,6	76,6
5240—5380	82,5	—	91,7	78,1	72,3	84,8	77,7	71,8	78,4
5380—5550	84,1	—	84,1	76,6	74,2	78,8	75,5	71,6	75,1
5550—5730	85,6	—	76,5	74,5	75,6	74,5	72,1	71,8	74,3
5730—5940	91,0	—	73,8	74,5	73,7	71,8	71,6	71,6	73,0
5940—6170	96,0	—	68,2	66,4	62,6	65	64,0	62,4	64,6
6170—6430	116	—	63,5	68,1	69,6	63,5	64,7	69,0	66,0
6430—6740	139	—	58,5	63,3	65,0	59,2	59,9	64,0	61,7
6740—7090	189	—	61,0	68,5	72,7	61,5	64,6	70,0	65,6
7090—7150	244	—	54,6	66,5	71,4	57,4	62,9	68,9	62,7
7150—7350	260	—	56,0	66,0	71,2	62,6	63,2	76,6	66,7
7350—7590	225	—	51,2	65,3	70	59,8	63,0	7,1	64,5
7590—7830	218	—	53,8	72,1	78	59,6	63,1	8,1	68,0
7830—8090	213	—	44,2	59,6	61,6	49,5	51,9	5,0	55,9
8090—8380	376	—	144	235	292	145	178	305	188
8380—8710	183	—	37,6	43,4	43,9	42,5	39,6	47	42,4
8710—9080	431	—	155	285	370	160	204	364	212
9080—9460	355	—	177	200	244	121	146	247	158
9460—9880	338	—	94,0	163	193	99,5	121	199	129
9880—10370	322	—	61,0	106	131	65,5	80,3	133	87,6
10370—10890	112	—	24,6	35,4	41,2	28,2	31,1	42,5	34,0
10890—11510	87,7	—	27,2	37,4	50,2	27,8	32,4	51,6	34,6
11510—12220	60,6	—	24,2	25,9	34,7	25,6	16,3	57,2	30,6

2. В номинальном режиме были измерены спектры излучения 5 типов ламп: ИФК-20 (на 2 экземплярах, 2 500 мкф, 130 в, 21,1 дж), ИФК-50 (2 экземпляра, 2 500 мкф, 200 в, 50 дж), ИФК-120 (2 430 мкф, 300 в, 109 дж), ИФК-300 (4 000 мкф, 300 в, 180 дж) и ИФК-500 (4 000 мкф, 500 в, 500 дж). Полученные результаты приведены в табл. (для ламп ИФК-20, ИФК-50 приведены средние из двух).

3. Проведено исследование зависимости спектра излучения лампы ИФК-120 от величины питающего напряжения и емкости питающего конденсатора. Для этого спектр был измерен при восьми режимах питания импульсной лампы. Напряжение изменялось от 125 до 1580 в, т. е. вплоть до напряжения пробоя. Емкость менялась в пределах от 8 до 5 800 мкф. Энергия вспышки в четырех из выбранных режимов составляла около 10 дж, в трех режимах около 45 дж и в одном (250 в, 5 800 мкф) — 181 дж. При этом для режима, соответствующего 1580 в, 8 мкф, резко отличающегося от других по излучению, спектр был обследован до $2\,285 \text{ \AA}$ с помощью увиолевой лампы; остальные режимы были измерены в диапазоне $3\,840 \div 12\,220 \text{ \AA}$. Все полученные данные сведены в табл.

Авторы приносят благодарность И. С. Маршаку, рекомендовавшему наиболее интересные объекты для исследования и любезно предоставившему соответствующие лампы, а также сотрудникам светотехнической лаборатории Т. Л. Кашириной, Л. Е. Святовой и О. А. Чернову, оказавшим помощь в проведении трудоемких измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] И. С. Маршак, Сборник материала по вакуумной технике, № 7, 3, 1955.
- [2] И. С. Маршак, Светотехника, № 1, 17, 1956.
- [3] И. С. Маршак, Светотехника, № 1, 17, 1957.
- [4] М. П. Ванюков, А. А. Мак, Н. В. Паразинская, Оптика и спектроскопия, № 5, 642, 1956.
- [5] E. V. Noel a. P. V. Davis, Photographic Science a. Technique, 1, № 1, 11, 1950.
- [6] G. A. Jones, Electronic Eng., June, 16, 1944.

И. С. МАРШАК, В. И. ВАСИЛЬЕВ, А. И. МИРОНОВА,
В. П. ИВАНОВ, Р. Г. ВДОВЧЕНКО

НОВЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАМПЫ

1. Определение типов

Импульсные источники света, обладающие кратковременной мощностью до нескольких мегаватт и световым потоком до десятков миллионов люменов, являются наиболее совершенным средством освещения при высокоскоростной фотографии и кинематографии — отрасли техники, вызвавшей к жизни эти источники. Вместе с развитием разнообразных применений высокоскоростной фотографии, требующих различных освещенностей, выдержек, частот следования кадров и т. д. последние годы у нас и за границей ознаменовались разработкой значительного ассортимента импульсных ламп с соответственно разнообразными параметрами и конструктивными особенностями. Пока еще не достигнуто никакой стандартизации типов ламп, даже в пределах отдельных стран.

На основании предварительного ознакомления с различными потребностями в последнее время был намечен ассортимент из более чем двух десятков типов импульсных ламп. Из них в настоящее время серийно вы-

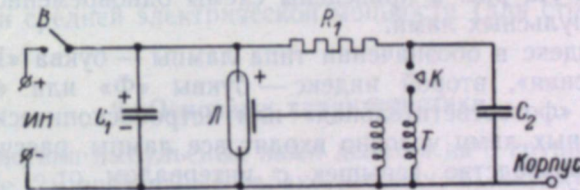


Рис. 1. Простейшая схема включения импульсной лампы.

ИН — источник постоянного тока, В — выключатель, C_1 — конденсатор питания лампы, накапливающий энергию в промежутке между вспышками, Л — импульсная лампа, R_1 — разделяющее сопротивление, C_2 — конденсатор питания импульсного трансформатора, Т — импульсный трансформатор, К — управляющий ключ.

пускается 12 типов, 4 типа заканчиваются разработкой и около 6 типов предполагается разработать в будущем. Основные номинальные характеристики этих ламп приведены в таблице.

Импульсная лампа представляет собой стеклянную или кварцевую колбу, в которую впаяны два токоведущих электрода и которая имеет внешний или внутренний электрод зажигания (лампа ИФК-15 имеет 2 электрода зажигания). Лампы обычно наполняются ксеноном при давлении 50—250 мм рт. ст. (давление ксенона в лампе ИСШ 500 —

Отечественные импульсные лампы

Тип лампы	Конструктивные данные			Предельные характеристики					Номинальный режим							Примечание	
	форма светящейся части	габариты светящейся части (в мм)	ориентировочное сопротивление лампы (в ом)	напряжение зажигания (в в)	напряжение самопробоя (в в)	средняя мощность (в вт)	фактор нагрузки (в мкф кв ⁴)	срок службы (в тыс. вспышек)	энергия вспышки (в дж)	рабочее напряжение (в в)	емкость питающего конденсатора (в мкф)	интервалы между вспышками (в сек.)	ориентировочная длительность вспышки (в мсек.)	световая энергия вспышки (в лм-сек.)	ориентировочный интеграл яркости по времени (в Мвт×сек.)		
ИФК-20	Прям.	4×10	0,16	100	700	2	1	10	20	130	2500	10	0,2	200	0,5	Предусмотрены варианты на 127 и 220 в, с зеркальной колбой	
ИФК-15	"	4×25	0,3	—	—	1	—	2	15	Сетевое питание	15	7	200	0,04			
ИФК-50	"	4×20	0,32	140	1000	5	6	10	50	200	2500	10	0,4	700	0,9		
ИФК-120	V-обр.	5×23×30	0,8	180	1000	12	25	10	120	300	2500	10	1	2500	0,9		
ИФК-500	Спир.	30×45	4	400	3500	30	250	10	500	500	4000	15	8	10000	0,7 габ		
ИФК-2000	V-обр.	9×70×40	0,45	250	2000	300	1000	5	2000	500	16000	15	4	60000	5		
ИФК-20000	Спир.	70×70×70	4	2000	20000	1000	1,5·10 ⁶	10	20000	6000	1100	20	2	600000	10		Требуется принудительного воздушного охлаждения
ИФБ-300	Кольцо	65×6	2,5	240	1500	40	250	10	300	300	6500	7,5	8	5000	0,40		
ИФП-200	Прям.	5×200	2	450	2000	27	600	10	200	500	1600	7,5	1,6	4000	0,35		
ИФП-500	"	5×350	3,5	450	3000	65	3200	10	500	500	4000	7,5	7	10000	0,58		
ИФП-1500	"	5×600	6	900	4000	100	17500	10	500	500	4000	7,5	7	10000	1,15		
ИФП-4000	"	6×800	8	1300	5000	270	32000	10	1500	1000	3000	15	9	35000	2,6		
ИФП-15000	"	9×600	1,8	1600	5000	1250	200000	10	4000	1400	4000	15	16	120000	9,3		
ИСТ-10	V-обр.	4×23×30	—	180	1000	10	20	20 час.	15000	2400	5000	12	4,5	500000	—	Возможна зеркальная колба	
ИСК-25	"	4×21×24	0,8	200	1000	25	105	200 час.	0,01	500	0,08	0,001	0,007	0,01	—		
ИСШ-15	Прям.	0,5×2,5	—	250	1500	15	—	300 час.	25	350	400	1	0,15	700	—		
ИСШ-500	"	1,5×8	—	5000	15000	500	—	—	0,03	450	0,3	0,002	0,002	0,1	—		
ИСП-10	"	1×62	30	700	3000	10	—	—	5	9000	0,12	0,01	0,006	50	0,8		
ИСШ-100-2	"	1×2,5	—	2500	5000	100	—	—	0,1	1000	0,2	0,01	0,01	0,1	—		
									0,2	3000	0,05	0,002	0,001	1,5	—		

4 ат.). Типичная принципиальная схема включения одной лампы показана на рис. 1. На рис. 2 приведены схемы одновременного включения нескольких импульсных ламп.

Первый индекс в обозначении типа лампы — буква «И» — означает слово «импульсная», второй индекс — буквы «Ф» или «С» — соответствует словам «фотоосветительная» или «стробоскопическая». В класс фотоосветительных ламп условно входят все лампы, рассчитанные в основном на производство вспышек с интервалом от 1 сек. и выше, а в класс стробоскопических ламп — все лампы, рассчитанные в основном на частоту вспышек более 1 герца. Третий индекс — буквы «К», «П» или «Б» и буквы «Т» или «Ш» — соответственно для фотоосветительных и стробоскопических ламп. Фотоосветительные лампы характеризуются видом светового пучка, который с их помощью получается в большинстве осветительных устройств. Лампы ИФК имеют компактное светящееся тело для помещения в фокусе отражателя, лампы ИФП — длинную, прямую разрядную трубку для использования с цилиндрической оптикой; лампы ИФБ представляют собой кольцо, надеваемое на объектив фотоаппарата, и образуют световой пучок, ось которого совпадает с оптической осью объектива. Стробоскопические лампы характеризуются видом колбы — трубчатой или шаровой (лампы ИСТ выполнены в трубчатых колбах и разряд в них имеет вид длинной светящейся нити; лампы ИСШ имеют широкую, иногда шаровую, колбу и расположенные в середине на малом расстоянии друг от друга электроды; светящееся тело этих ламп приближается к точке).

Число после букв в обозначении типа лампы соответствует округленному номинальному значению энергии вспышки (для фотоосветительных ламп) или средней электрической мощности (для стробоскопических ламп).

2. Основные характеристики

Характеристики импульсных ламп делятся на 3 группы: 1) конструктивные данные, 2) предельные характеристики, 3) характеристики номинального рабочего режима.

Помимо формы и размеров светящегося тела, в первую группу целесообразно включить сопротивление канала разряда в лампе, когда последний заполняет внутреннее сечение разрядной трубки. Плазма импульсного разряда имеет почти постоянное удельное сопротивление $\rho \approx 0,02 \text{ ом} \cdot \text{см}$ [1].¹ Вследствие этого сопротивление разряда равно $R = \frac{4\rho l}{\pi D^2}$, где l — расстояние между электродами, а D — внутренний диаметр разрядной трубки.

Подбор конструктивных данных наших ламп основывался на том, чтобы, используя по возможности наименьшее число типов ламп, создать наиболее универсальный ассортимент в отношении размеров и формы светящегося тела, а также интенсивности излучения и длительности вспышки.

¹ При очень высоких градиентах, характерных для ламп ИСШ, ρ снижается до 0,005—0,01 ом·см.

Для критической оценки предлагаемой нами системы типов импульсных ламп целесообразно дать представление о природе различных предельных характеристик и об их связи с конструктивными данными.

Основными предельными характеристиками импульсных ламп являются:

1. Напряжение зажигания U_z . (минимальное напряжение на питающем конденсаторе, достаточное для возникновения разряда при подаче управляющего импульса на электрод зажигания).

2. Напряжение погасания U_n . (остаточное напряжение на конденсаторе).

3. Напряжение самопробоя U_c . (наибольшее напряжение на питающем конденсаторе, при котором гарантируется отсутствие самопробоя).

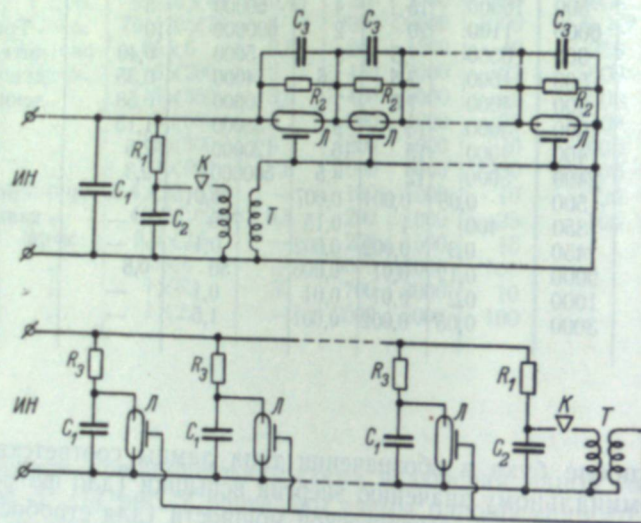


Рис. 2. Схемы последовательного и параллельного включения нескольких импульсных ламп.

Цепочка $R_2 - C_3$ — делитель напряжения ($R_2 - 1$ мгом, $C_3 - 0,5$ мкф), R_3 — зарядные сопротивления, по порядку величины равные T/C , T — интервал между вспышками (в сек.).

вольного возникновения разряда без подачи зажигающего импульса, не следует считать, что при напряжении выше U_c обеспечивается надежное зажигание разряда без зажигающего импульса — для этого напряжение должно превышать U_c в 2—3 раза).

4. Предельная нагрузка лампы (предельная энергия отдельной вспышки и предельная средняя мощность, которую лампа способна рассеять).

5. Срок службы при максимально допустимой нагрузке.

Критические напряжения U_z , U_n и U_c приблизительно пропорциональны расстоянию между электродами. Величина U_n для ламп с внутренним диаметром трубки, равным нескольким миллиметрам и выше, на порядок ниже, чем U_z . Так как энергия, накопленная в конденсаторе, пропорциональна квадрату напряжения, то U_n обычно практически не влияет на КПД лампы. Только для ламп с диаметром менее 1 мм U_n начинает приближаться к U_z . Величина U_c в несколько раз превышает U_z .

Благодаря большой широте так называемого «диапазона управляемости» (диапазона возможного варьирования напряжения питания лампы, при котором обеспечивается ее управляемое зажигание) импульсные лампы могут иметь бесчисленное количество рабочих режимов с самыми различными интенсивностью, длительностью и частотой повторения вспышек, о связи между которыми мы скажем при анализе характеристик номинального рабочего режима.

Напряжение зажигания примерно пропорционально квадратному корню из давления ксенона. Оно очень сильно зависит от чистоты наполняющего газа [2]. Напряжение самопробоя зависит от чистоты газа гораздо слабее и, грубо говоря, пропорционально давлению.

Нагрузка лампы по средней рассеиваемой в ней мощности определяется условиями охлаждения колбы и максимально допустимой рабочей температурой последней. Рабочая температура стеклянных ламп не должна превышать $150-200^\circ$, кварцевых — $500-600^\circ$ С. В условиях естественного охлаждения стеклянные лампы способны рассеивать 1—2 Вт средней мощности на 1 см длины разрядной трубки. Переход на кварц или применение принудительного охлаждения позволяет увеличить среднюю мощность в 5—10 раз.

Предел энергии отдельной вспышки связан с тремя ограничивающими факторами: растрескиванием стекла, взрывом колбы и потерей управляемости лампы [3]. Для стеклянных трубчатых ламп основное значение имеет первый фактор; для кварцевых ламп все три фактора устанавливают примерно один и тот же предел нагрузки. Предельная нагрузка лампы сильнее всего зависит от длительности вспышки, пропорциональной величине C_1 . Для стеклянных ламп хорошо выполняется соотношение:

$$(CU^4)_{\text{пред.}} / I^3 = \text{Const.} \quad (1)$$

Для конкретного типа ламп величина в правой части этого уравнения является константой, которую мы назвали «фактором нагрузки» данного типа. Фактор нагрузки весьма слабо зависит от диаметра, толщины стенки, частоты вспышек, рода и давления газа.

Для кварцевых ламп приведенное выше уравнение принимает вид:

$$(CU^{3,6})_{\text{пред.}} / I^{2,6} = \text{Const.} \quad (2)$$

Константа существенно зависит от диаметра трубки при $D < 12$ мм.

В отношении ламп ИСШ мы пока располагаем весьма скудными данными о предельных нагрузках, не позволяющими вывести какие-либо общие закономерности. По-видимому, целесообразно среднюю мощность стеклянных ламп ИСШ ограничить ~ 100 Вт, а кварцевых ламп ~ 1000 Вт (мощность, которая может быть рассеяна шаровой кварцевой колбой диаметром 50—60 мм, оптимальной по прочности).

При одиночных вспышках лампы последнего типа выдерживают энергию порядка 100 Дж.

Срок службы импульсных ламп обычно ограничивается распылением катода и сильно зависит от энергии вспышки лампы. Приблизительно он определяется суммарной энергией всего количества разрядов, которое может быть пропущено через лампу. Благодаря применению в новейших лампах активированных катодов (пленка щелочного металла, блок-катоды с содержанием щелочноземельных металлов) срок службы ламп в последнее время увеличен по крайней мере на порядок и исчисляется десятками тысяч вспышек с максимально допустимой энергией. При малых энергиях срок службы может быть доведен до миллионов вспышек.

Рабочий режим лампы характеризуется в основном энергией вспышки, равной $\frac{CU^2}{2}$ (C — емкость питающего конденсатора, U — напряжение на нем перед разрядом), интервалом между вспышками, длительностью и светотехническим параметром — световой энергией, освещиванием и интервалом яркости вспышки по времени (для стробоскопических ламп удобнее пользоваться средними значениями светотехнических величин).

С целью сокращения испытаний ламп на срок службы в качестве минимального рабочего режима обычно выбирается максимально интенсивный режим, не вызывающий термического разрушения лампы. Ввиду увеличения допустимой энергии вспышки при снижении рабочего напряжения [формулы (1) и (2)] последнее берется только на 10—50% выше напряжения зажигания (в зависимости от характера источника питания). Емкость C подбирается такой, чтобы энергия вспышки составляла 50—60% предельного значения, при котором наступает разрушение колбы. Интервал T между вспышками должен быть таким, чтобы средняя мощность, рассеиваемая в лампе (равная $\frac{CU^2}{2T}$), соответствовала предельной характеристике.

Всякая лампа может использоваться в любом другом рабочем режиме, не выходящем за рамки предельных характеристик. Вследствие этого конкретные эксплуатационные параметры могут весьма сильно отличаться от параметров, приведенных в таблице, вплоть до того, что фотоосветительные лампы могут использоваться как стробоскопические и наоборот.

Потребители импульсных ламп должны иметь представление о связи между световыми характеристиками ламп и их конструктивными данными и параметрами питания.

Длительность вспышки (обычно ее приравнивают времени, в течение которого сила света лампы превышает 35% максимального значения трубочатой лампы при емкостях конденсатора, достаточных для заполнения каналом разряда всего сечения разрядной трубки, приближенно равна величине

$$\frac{RC}{2}$$

При малых C (меньше десятка мкф) длительность значительно превышает $\frac{RC}{2}$ и начинает сильно зависеть от индуктивности L разрядной контура, доходя для коротких ламп при $L \sim 10^{-7}$ гн до долей микросекунды.

Световая отдача η (световая энергия вспышки, отнесенная к энергии, накопленной в питающем конденсаторе) большинства фотоосветительных ламп лежит в пределах от 20 до 50 лм·сек./дж [4]. Она возрастает с градиентом напряжения E в лампе, ее внутренним диаметром D , длиной трубки l и давлением газа p_0 , если названные величины не превышают значений: $E=50$ в/см, $D=6-8$ мм, $l=30$ см, $p_0=100-150$ мм рт. ст. При более высоких значениях этих параметров η не зависит от них. При малых емкостях питающего конденсатора, при которых канал разряда перестает заполнять сечение трубки, с уменьшением емкости, наблюдается быстрое уменьшение η . Вследствие этого η для ламп, работающих в стробоскопическом режиме, сильно зависит от частоты вспышек f (пропорционально f). На рис. 3 показаны соответствующие зависимости для лампы ИСТ-10 и для лабораторных образцов аналогичной лампы с умень-

шенным до 1 мм внутренним диаметром разрядной трубки. Для ламп ИСТ зависимость η от f , по-видимому, выражена не так резко.

Для кварцевых трубочатых ламп максимальный интеграл яркости зависит только от величины Cl (рис. 5) и не зависит от диаметра разряд-

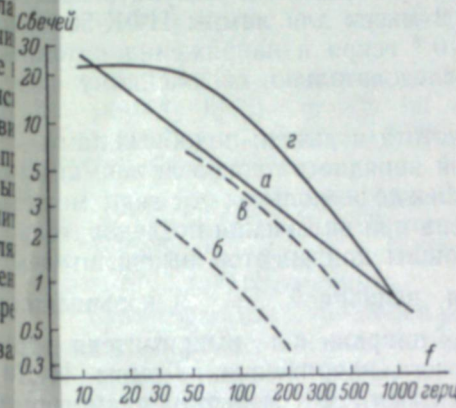


Рис. 3. Зависимость световой отдачи лампы ИСТ-10 (график *a*) и аналогичной лампы с капиллярной разрядной трубкой (график *z*) от частоты вспышки. Мощность 10 Вт. Кривые *b* и *в* — аналогичные графики для английской лампы LSD-8 при мощности 10 и 20 Вт.

ной трубки ($D=4-12$ мм). Величина $\int Bdt$ существенна для расчета многих фотоосветительных устройств. При их проектировании, очевидно, целесообразно пользоваться максимальными емкостями питающих конденсаторов, при которых длительность вспышки не выходит за допустимые пределы. На основании рис. 4 и выражения (3) могут быть получены графики зависимости максимального интеграла яркости от внутреннего диаметра разрядной трубки при различных длительностях вспышки, приведенные на рис. 5.

3. Конкретные особенности отдельных типов

Рассмотрев общие закономерности, определяющие характеристики импульсных ламп, перейдем теперь к конкретному рассмотрению отдельных типов в предложенном ассортименте.

а) Малые трубочатые лампы. К названной группе мы относим лампы ИФК-20, 50, 120 (различающиеся между собой по длине трубки и фактору нагрузки), ИФК-15 и ИСТ-10. Эти лампы

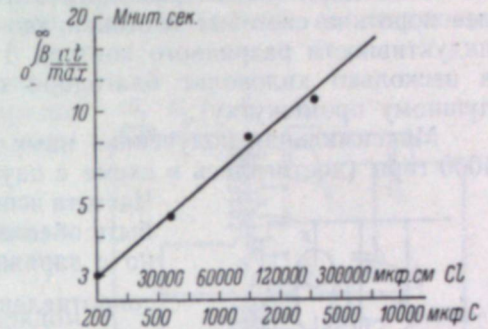


Рис. 4. Зависимость максимального интеграла яркости от произведения Cl для прямых кварцевых ламп.

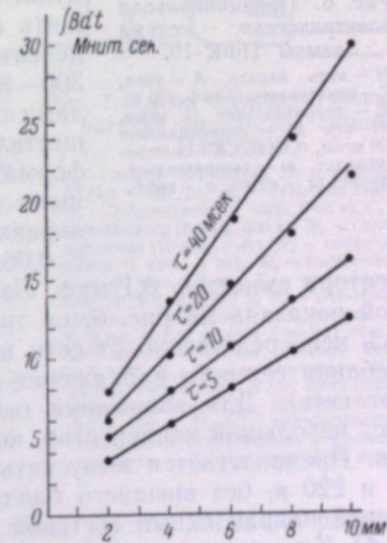


Рис. 5. Зависимость максимального интеграла яркости от диаметра трубки при определенных длительностях вспышки (прямые кварцевые лампы).

предназначаются для фотографирования или киносъемки небольших близко расположенных объектов (в том числе внутрисредственного фотографирования), фоторепродукционных работ, тепловых и сверхскоростных съемок и т. д.

Благодаря малым размерам эти лампы позволяют получать наиболее короткие световые вспышки (до 0,2 мксек для лампы ИФК-50) при индуктивности разрядного контура $3 \cdot 10^{-8}$ генри и напряжении питания в несколько киловольт благодаря последовательно включенному в разрядную цепь конденсатору.

Максимальная полученная нами частота вспышек подобных ламп составляет 4000 герц (достигалась в схеме с паузой зарядного тока после вспышки).

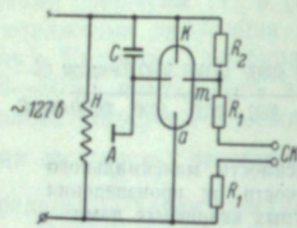


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема лампы ИФК-15.

Н — нить накала, А — анод, С — конденсатор (2 мкф, 170 в), R_1 — сопротивление (1 мгом, 0,1 вт), R_2 — сопротивление (20 мгом, 0,1 кв), СК — синхронизатор, Г — газоразрядная трубка (к — катод, а — анод).

денсатора емкостью 0,1 мкф. Лампа ИФК-15, принципиальная схема которой показана на рис. 6, не требует накопительного конденсатора, питаемая непосредственно от сети переменного тока (в течение $1/4$ периода колебания сетевого напряжения разряд в лампе непосредственно нагревает сеть). Для зажигания основного искрового промежутка лампы имеет небольшой конденсатор, который может монтироваться внутри баллона. Предполагается выпускать варианты этой лампы на напряжениях 127 и 220 в, без внешнего баллона, а также в зеркализованной колбе дающей направленный световой пучок.

б) Крупные трубчатые лампы. К этой группе мы относим лампы ИФК-500, 2000 и 20000 (последние две — кварцевые) ИФБ-300.

Лампы предназначаются для фотографирования и киносъемки протяженных и удаленных объектов, в том числе для цветной съемки. Из-за больших размеров лампы не могут давать вспышки короче нескольких десятков микросекунд. При высокоскоростной съемке целесообразно применять такие лампы в совокупности с затворами, отсекающими короткий промежуток времени на протяжении более длительной вспышки. Для равномерного освещения при скоростной киносъемке различных кадров в пределах одной вспышки лампы можно питать от искусственной линии, формирующей П-образный импульс тока.

Питание ламп может производиться от электролитических конденсаторов ЭФ-500—1000 или от бумажно-масляных конденсаторов ИМ-3—100 и т. п. Лампа ИФК-2000 имеет столь низкое напряжение зажигания

что ее питание может осуществляться без накопительного конденсатора, непосредственно от сети переменного тока напряжением 220 в. Соответствующая схема изображена на рис. 7. При таком питании за вспышку длительностью $1/200$ сек. в лампе рассеивается энергия около 400 дж. Все лампы данной группы имеют внешний электрод зажигания, на который подается импульс от трансформатора без сердечника со следующими данными:

Стеклоянные лампы: I обм. — 27 витков ПЭЛ $\varnothing 0,8$ на оправке $\varnothing 8 \times 30$ мм, II обм. — 3000 витков ПЭШО $\varnothing 0,07$.

Кварцевые лампы: I обм. — 25 витков ПЭЛ $\varnothing 0,93$ на оправке $\varnothing 21 \times 50$ мм, II обм. — 2500 витков ПЭШО $\varnothing 0,15$ (масляный).

Трансформаторы питаются разрядом конденсатора 0,5—4 мкф, заряженного до напряжения 400—800 в.

Лампу ИСК-25 предполагается выполнить в зеркализованной колбе.

в) Лампы ИСШ. Заканчиваемые разработкой лампы ИСШ-15 и ИСШ-500¹ благодаря малым размерам светящегося объема могут быть использованы для киноосветительной аппаратуры прожекторного типа с узким световым пучком. Лампа ИСШ-15 проверялась при частоте вспышек до 500 гц, ИСШ-500 — до 100 гц. Специальная работа над схемами включения этих ламп несомненно позволит значительно расширить их частотный диапазон. Малые размеры искрового промежутка лампы позволяют получать вспышки длительностью порядка 1—3 мксек. Лампа ИСШ-15 имеет весьма большой срок службы при номинальной мощности. При кратковременной работе ее мощность может быть значительно форсирована. Лампа ИСШ-500 рассчитана на небольшой срок службы. При работе в течение нескольких секунд ее мощность также может быть увеличена.

Серийный выпуск и эксплуатация ламп ИСШ в различных условиях позволяет расширить сведения об этих лампах.

Заключение

Описанный ассортимент новых импульсных ламп является первой попыткой наметить систему типов этих ламп, обеспечивающую разнообразных потребителей. Эта система должна окончательно установиться в результате обсуждения и практической проверки. Авторы выражают

¹ Разработчиком лампы ИСШ-500 является инж. Л. И. Щукин. В разработке лампы ИСШ-15, помимо работников завода, принимал участие сотрудник ВНИСИ И. Ш. Либин.

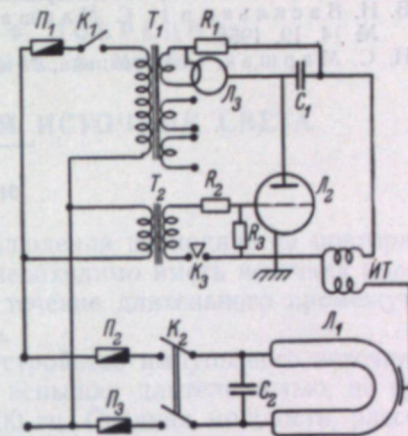


Рис. 7. Схема бесконденсаторного питания импульсной лампы ИФК-2000.

Л₁ — лампа ИФК-2000, Л₂ — тиратрон ТГИ-1 — 130 (10), Л₃ — кенотрон 2112С, С₁ — конденсатор (1 мкф, 1000 в), С₂ — конденсатор (8 мкф, 500 в); R₁ — сопротивление (70 ком, 2 вт), R₂ — сопротивление (1 ком, 1 вт), R₃ — сопротивление (20 ком, 0,5 вт), Т₁ — трансформатор 220/600, 2,5; 6,3 в, Т₂ — пик-трансформатор (I обм. — 1800 витков $\varnothing 0,38$ мм, сечен. железа 8 см²; II обм. — 2500 витков $\varnothing 0,1$ мм, сечение железа 1 см²), К₁, К₂ — выключатели, К₃ — датчик импульсов, ИТ — импульсный трансформатор, П₁, П₂ — предохранитель (0,5 а, 250 в), П₃ — предохранитель специальные (параллельно 8 проволок из меди $\varnothing 0,2$ мм, длиной 50 мм).

надежду на активную помощь в выработке системы со стороны потребителей ламп и в первую очередь со стороны работников, применяющих импульсные лампы для высокоскоростной фотографии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] И. С. Маршак, Светотехника, № 6, 22, 1957.
 [2] И. С. Маршак, Сборник материалов по вакуумной технике, № 13, 12 и 28, 1957.
 [3] В. И. Васильев и И. С. Маршак, Сборник материалов по вакуумной технике, № 14, 19, 1958.
 [4] И. С. Маршак, Светотехника, № 1, 17, 1957.

М. П. ВАНЮКОВ, А. Ф. ДОБРЕЦОВ,
 В. И. ИСАЕНКО и А. А. МАК

МОЩНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК СВЕТА

Введение

При стробоскопическом методе наблюдения периодически повторяющихся процессов в некоторых случаях необходимо иметь источник коротких световых вспышек, работающий в течение длительного промежутка времени с большой средней мощностью.

В настоящей работе описывается устройство импульсного источника света, позволяющее получать световые вспышки длительностью, не превышающей 1 мксек., с частотой до 4 000 гц. Средняя мощность, рассеиваемая в лампе в течение длительного промежутка времени (~ 0,5 часа), может достигать 4 квт.

Схема питания импульсной лампы

В основу разработанной схемы положен принцип, предложенный Кнохенхауером [1] еще в 1858 г. для получения однократных искровых разрядов и в дальнейшем примененный Махом [2], Кранцем и Шардиным [3], А. И. Салищевым [4], М. П. Ванюковым [5] и другими в установках искрового фотографирования для получения одиночных световых вспышек. Принцип действия схемы можно проследить на рис. 1. Искровой промежуток S включается в контур, составленный из двух последовательно соединенных конденсаторов C_1 и C_2 . Оба конденсатора заряжаются одновременно от высоковольтного источника постоянного напряжения через индуктивности L_1 и L_2 . Если параметры обеих зарядных цепей будут одинаковы ($C_1 = C_2$ и $L_1 = L_2$), то и напряжение на электродах будет возрастать по одинаковому закону, и, следовательно, электроды будут находиться под одинаковым потенциалом. Разность потенциалов между электродами создается с помощью дополнительной цепи, составленной из небольшой катушки индуктивности L_0 и коммутирующего элемента K . Замыкание ключа K вызывает колебательный разряд конденсатора C_1 через индуктивность L_0 , в результате чего напряжение на конденсаторе C_1 изменит знак на обратный через промежуток

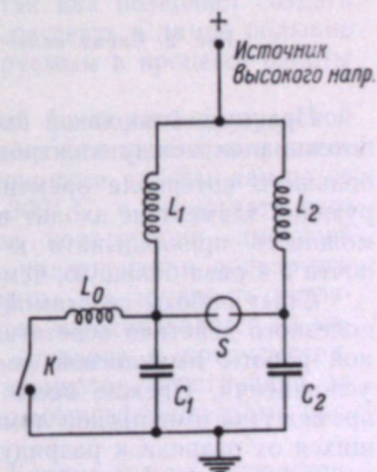


Рис. 1. Принципиальная схема включения импульсной лампы.

на конденсаторе C_1 изменит знак на обратный через промежуток

времени, соответствующий половине периода колебаний контура, составленного из емкости C_1 и индуктивности L_0 . Таким образом, к электродам искрового промежутка окажется приложенной разность потенциалов в два раза большая, чем та разность потенциалов, до которой первоначально были заряжены конденсаторы C_1 и C_2 . Если эта разность потенциалов достигнет величины пробивного напряжения, то через лампу произойдет разряд конденсаторов C_1 и C_2 , которые могут вновь зарядиться, если в соответствующий момент времени разомкнуть ключ K . Таким образом, имеется возможность применения описанной выше схемы для получения повторных разрядов в одном искровом промежутке.

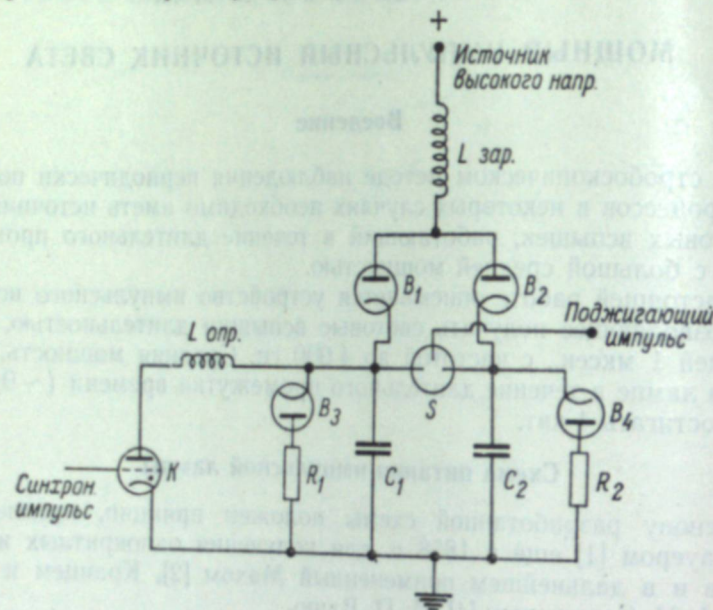


Рис. 2. Схема включения лампы с высокой частотой повторения вспышек.

Преимущество такой схемы будет заключаться в том, что разность потенциалов между электродами лампы существует только в течение небольшого интервала времени $\tau = \pi \sqrt{L_0 C_1}$ перед вспышкой; коммутирующий элемент не входит в основной разрядный контур, и имеется возможность прикладывать к электродам лампы разность потенциалов почти в 4 раза большую, чем напряжение источника питания.

Опыт работы со схемой показал, что для повышения коэффициента полезного действия осветительной установки и для обеспечения регулярной работы импульсной лампы необходимо ввести в схему некоторые усложнения. Прежде всего это связано с тем, что пробой разрядного промежутка импульсной лампы S происходит при напряжениях, изменяющихся от разряда к разряду. Поэтому для бесперебойной работы лампы на его электроды необходимо подавать импульсное напряжение, превышающее в 1,2—1,5 раза напряжение, при котором происходит наибольшее число разрядов. Детальный анализ работы схемы показал, что в случае пробоя промежутка S до момента полного опрокидывания на конденсаторе C_1 , т. е. при наличии тока в индуктивности L_0 , конденсаторы C_1 и C_2 зарядятся до отрицательного потенциала, что приводит к появлению на них перенапряжения в последующий зарядный цикл. Появление такого перенапряжения вызывает опасность пробоя

конденсаторов, и, кроме того, перекачка энергии в схеме приводит к снижению ее кпд. Этот недостаток можно устранить, если ввести в лампу третий электрод и подавать на него включающий импульс в момент времени, в который происходит полное опрокидывание напряжения на конденсаторе C_1 , т. е. когда ток в цепи опрокидывания равен нулю.

На рис. 2 представлен вариант схемы для питания трехэлектродных импульсных ламп. Применение зарядной цепи, составленной из одного дросселя $L_{зар.}$ и двух кенотронов B_1 и B_2 , позволяет удваивать зарядное напряжение на конденсаторах C_1 и C_2 по сравнению с напряжением источника питания и устраняет возможность возникновения колебаний в зарядной цепи в том случае, если не произойдет срабатывания промежутка S . Возникающий при этом отрицательный заряд на конденсаторе C_1 снимается с помощью цепочки $B_3 r_1$. Параметры цепочки можно подобрать таким образом, чтобы за интервал времени между очередными вспышками этот заряд снимался не полностью. В результате этого к моменту очередной вспышки на электродах разрядного промежутка должна возникнуть повышенная разность потенциалов, что будет способствовать пробое промежутка S . В случае, если по какой-либо причине произойдет преждевременный пробой промежутка S , то небольшой остаточный отрицательный заряд на конденсаторах C_1 и C_2 будет снят тушащими цепочками $B_3 r_1$ и $B_4 r_2$, в результате чего напряжение на конденсаторах при последующем заряде не будет повышенным.

Управление работой схемы осуществляется генератором задающих импульсов, с помощью которого производится замыкание ключа K (водородного тиратрона) и с задержкой во времени, соответствующей $\tau = 10$ мксек., включение основного контура.

Импульсная лампа

В описываемом осветительном устройстве была использована разборная импульсная лампа, которая имеет ряд существенных преимуществ перед отпаянной импульсной лампой, так как позволяет создать разрядный контур с меньшей индуктивностью, рассеять в лампе большие мощности и получить источник света с регулируемым в процессе работы давлением газа.

Основная трудность при создании мощной разборной импульсной лампы, работающей при высоком давлении наполняющего газа и высоком напряжении, заключается в том, что в процессе работы лампы ее корпус нагревается до температуры в 200—300° С, в результате чего происходит расширение отдельных элементов конструкции, имеющей значительное количество вводов, ухудшаются уплотнения и появляется утечка газа. В предлагаемой конструкции лампы эта трудность устраняется тем, что часть прижимных колец и болтов изготавливается из металла с малым коэффициентом расширения (инвара) и предусматривается компенсация расширения отдельных элементов конструкции за счет применения деталей, обладающих различными коэффициентами расширения.

Общий вид лампы представлен на рис. 3. Корпус лампы 1 представляет собой цилиндрический стакан диаметром 160 мм, изготовленный из латуни и имеющий ребристую боковую поверхность для воздушного охлаждения. В передней стенке корпуса укрепляется кварцевое окно 2, обеспечивающее выход света из лампы в угле 120°. В заднюю стенку корпуса вводится специальная ребристая втулка 20 из ультрафарфора, в которой в свою очередь крепится один из вводов 19, служащий для подачи высокого напряжения к вольфрамовому электроду 4. Другой вольфрамовый

электрод 3 искрового промежутка закрепляется на стойке, устанавливаемой непосредственно на дне корпуса лампы. В корпус лампы вводится также «свеча» 5, предназначенная для подачи на дополнительный электрод 6 импульса высокого напряжения, необходимого для включения лампы. Непосредственно вокруг корпуса лампы, с помощью коротких и широких латунных шин 17, монтируются спаренные между собой

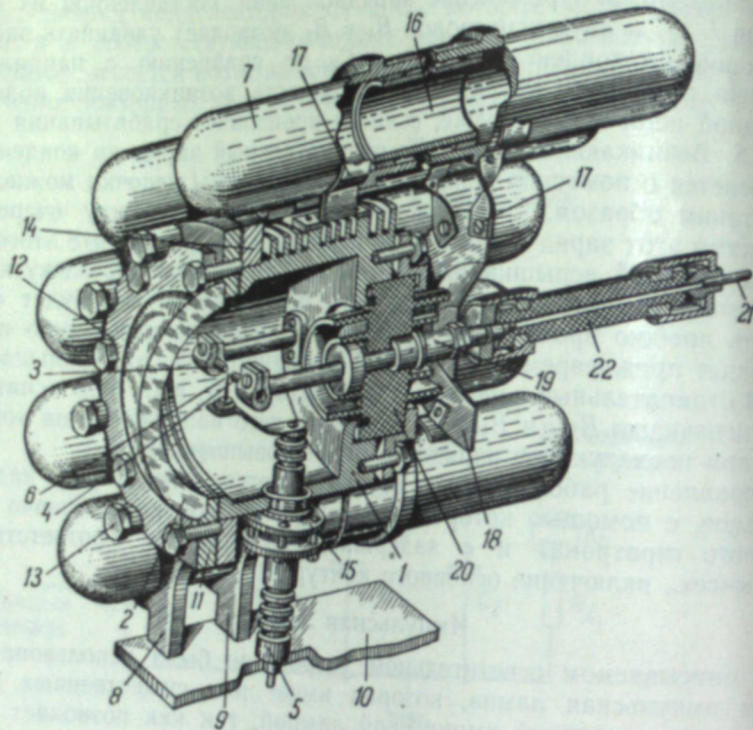


Рис. 3. Вид лампы в разрезе.

мические конденсаторы 7 горшкового типа. Внутренние обкладки конденсаторов соединены между собой латунной втулкой 16, а внешние обкладки одной группы конденсаторов подсоединены через хомуты 17 к корпусу лампы к электроду 3, а другой группы — через латунный диск 14 и ввод 19 к электроду 4. Разрядный контур составлен из двух последовательно включенных блоков конденсаторов, предназначенных для работы в описанной выше схеме. Конденсаторы имеют емкость 4 700 пф каждый. Общая емкость блока конденсаторов составляет 0,022 мкф. Индуктивность разрядного контура, измеренная по периоду колебаний тока, составляет 0,06 мкГн. Лампа наполняется техническим аргоном, который поступает из баллона через внутреннее отверстие центрального ввода. Для изоляции металлического газопровода 21 от центрального ввода между ними поставлена текстолитовая втулка 22.

Лампа может работать при давлениях газа до 10 ат. Напряжения на электродах доводилось до 28 кв при длине искрового промежутка 7 до 10 мм. С описанной выше схемой разборная лампа работала с частотой вплоть до 4 кгц. При некоторых режимах работы установки были получены средние мощности в лампе свыше 4 квт.

В таблице приводится ряд режимов работы осветительного устройства, состоящего из описанной выше лампы и схемы для ее питания.

Частота следования вспышек (в гц)	Емкость конденсатора зарядного контура (в мкф)	Напряжение на электродах лампы (в кв)	Энергия на один разряд (в лж)	Средняя мощность, рассеиваемая в разрядном контуре (в квт)	Давление газа (в ат)
500	0,015	22,4	3,8	1,9	6,5
800	0,032	16,4	4,3	3,4	8,5
1000	0,032	16,4	4,3	4,3	9,0
1500	0,015	14,3	1,5	2,25	6,5
4000	0,005	9,6	0,23	0,92	6,0

ЛИТЕРАТУРА

- [1] B. Glatzel. Elektrische Methoden der Momentphotographie. Braunschweig, 1915.
- [2] H. Schardin. Beiträge zur Ballistik und technischen Physik. Leipzig, 1938.
- [3] C. Cranz und H. Schardin, Z. Phys., 56, 147, 1929.
- [4] А. И. Салищев, Наст. сб., стр. 155.
- [5] М. П. Ванюков, ЖТФ, 16, № 8, 889, 1946.

Н. Н. ОГУРЦОВА и И. В. ПОДМОШЕНСКИЙ

ИСТОЧНИК СВЕТА ДЛЯ СКОРОСТНОЙ КИНОКАМЕРЫ

При частоте съемки около $10\ 000\ 000\ \text{сек.}^{-1}$ для освещения снимаемых объектов необходим источник света чрезвычайно большой яркости ($10^8 \rightarrow 10^7\ \text{сб}$), причем за время съемки яркость источника не должна испытывать существенных изменений.

Обычно в качестве источника света большой яркости используется искровой разряд при высоких плотностях тока. Увеличение плотности тока, а следовательно, и яркости разряда, может быть получено ограничением диаметра канала разряда [1]. Если при этом разряд питается импульсами тока, то в течение всей длительности импульса в разряде будет сохраняться постоянство плотности тока.

В настоящей работе в качестве источника света использовалось искровое разрядное устройство, в котором в качестве источника света использовалось искровое разрядное устройство (рис. 1). Толщина пластины составляет 10 мм, диаметр отверстия 2 мм.

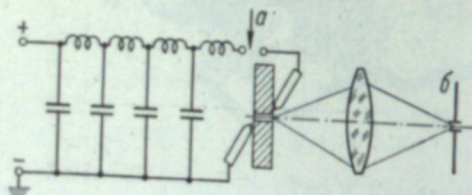


Рис. 1. Принципиальная схема установки. а — включающий промежуток, б — щель спектрографа.

Показало, что длительность импульса приблизительно равна $1 \cdot 10^{-4}$ сек., амплитуда тока разряда — 13 000 а, амплитуда напряжения на промежутке — 1 000 в. Плотность тока такого разряда составляет $4 \cdot 10^5\ \text{а/см}^2$. Осциллограммы тока и напряжения приведены на рис. 2.

Из осциллограмм видно, что по форме ток и напряжение разряда подобны, т. е. разряд имеет возрастающую вольт-амперную характеристику. Наличие возрастающей вольт-амперной характеристики позволило получить хорошее согласование сопротивления нагрузки с волновым сопротивлением линии. Сопротивление нагрузки равнялось волновому сопротивлению линии и слагалось из сопротивления промежутка (0,08 ома) и активного сопротивления разрядного контура (0,04 ома). Наблюдаемое в этих условиях необычайно высокое значение напряжения на столбе разряда объясняется, как показали последующие опыты, чрезвычайно большими давлениями, существующими в канале. Постоянство тока и напряжения разряда во времени указывает на то, что и давление в канале во время импульса не испытывает существенных изменений.

Максимальное значение давления в канале было определено крещерным методом, широко используемым при исследованиях внутренней

плестики. При этом специально изготовленная крещерная пробка малых размеров помещалась в средней части боковой стенки канала разряда и существенно не меняла условий разряда. Давление определялось по величине обжатия медного конического крещера и оказалось равным 0 ат. Отсутствие повышения

пряжения и яркости свечения начальной стадии разряда указывает на то, что высокое значение давления не определяется разогревом объема воздуха канала. Повышение давления связано с бурным испарением материала стенки отверстия. На это указывают хорошо заметное разрастворение отверстия, а также наблюдаемые в излучении факела углерода, входящего в состав материала стенки.

Фотографии спектра разряда приведены на рис. 3. В осевом направлении канал разряда излучает непрерывный спектр, перенесенный линиями поглощения и

испускания. Линии испускания принадлежат ионам, а линии поглощения — атомам элементов, входящих в состав электродов и материала стенки.

Линейчатый спектр по обе стороны от сплошного принадлежит излучению факела, вышедшего из отверстия.

Из сравнения спектров канала факела видно, что для них обращенные линии являются общими. Это указывает на то, что поглощение непрерывного излучения канала происходит в факеле.

Наблюдаемый в испускании линейчатый спектр возбуждается на концах канала разряда, где давление значительно меньше. При неизмен-

ной плотности тока понижение давления приводит к возрастанию температуры и, следовательно, интенсивности линий с высокими потенциалами возбуждения.

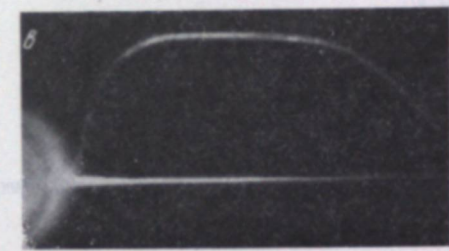
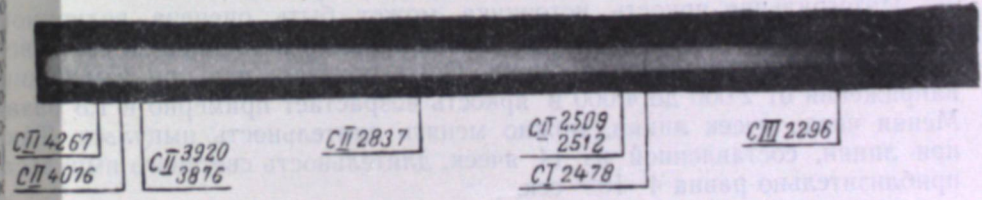


Рис. 2. Осциллограммы: а — тока, б — напряжения, в — свечения разряда.



СП 4267 СП 3920 СП 2837 СП 2509 / 2512 СП 2296
 СП 4076 СП 3876 СП 2478

Рис. 3.

ной плотности тока понижение давления приводит к возрастанию температуры и, следовательно, интенсивности линий с высокими потенциалами возбуждения.

Как показали опыты, при понижении давления окружающей атмосферы до 1 мм рт. ст. спектр не меняется. Это еще раз подтверждает высказанное ранее предположение, что высокое давление в канале создается газами, образующимися при испарении материала стенки. Уменьшение длины столба от 10 до 5 мм также существенно не меняет спектр. При дальнейшем уменьшении длины столба падает интенсивность непрерывного и возрастает относительная интенсивность линейчатого спектра. Аналогичная картина наблюдается и при диаметре отверстия свыше 3 мм.

Непосредственное измерение поглощения показало, что при диаметре отверстия 2 мм столб разряда длиной 10 мм полностью поглощает падающее на него излучение. Вследствие сильной реабсорбции в разряде имеет место насыщение излучения, и следует ожидать, что оно будет близко к излучению абсолютно черного тела. Осциллограмма монохроматического излучения была приведена на рис. 2.

В области $2\,500 \div 5\,500 \text{ \AA}$ форма световых импульсов постоянна и аналогична форме импульсов тока и напряжения. Таким образом, в этих условиях временной ход яркости соответствует временному ходу импульса тока. Воспроизводимость амплитуды и длительности светового импульса сохраняется в пределах 2—4%.

В области $4\,100 \div 5\,700 \text{ \AA}$ была измерена спектральная плотность энергетической яркости. Измерения производились фотоэлектрическим методом [2] путем сравнения яркости исследуемого источника с яркостью калиброванной по излучению ленточной лампы. По формуле Планка была рассчитана яркостная температура. Зависимость яркостной температуры от длины волны приведена на рис. 4. В пределах погрешности измерения яркостная температура не меняется с длиной волны и равна $32\,000^\circ \text{ K}$, а излучение источника в этой области соответствует излучению абсолютно черного тела при этой температуре.

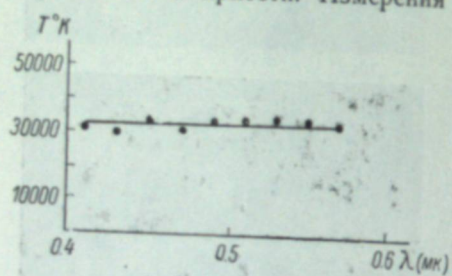


Рис. 4.

Приведение излучения разряда к излучению абсолютно черного тела в данном случае достигается за счет значительного повышения давления и мощности в канале по сравнению с импульсными лампами. Отклонения от распределения абсолютно черного тела обусловлены линейчатым поглощением в факеле и излучением на краю отверстия.

Интегральная яркость источника может быть оценена величиной 10^7 сб. Возможно дальнейшее увеличение яркости источника за счет увеличения напряжения заряда линии. Опыт показал, что при изменении напряжения от 2 000 до 4 000 в яркость возрастает примерно в 1,5 раза. Меняя число ячеек линии, можно менять длительность импульса. Так, при линии, составленной из 14 ячеек, длительность светового импульса приблизительно равна $4 \cdot 10^{-4}$ сек.

По величине яркости данный источник света пригоден для исследования спектров поглощения, аномальной дисперсии и для скоростной киносъемки. Кроме того, описанная форма разряда может быть использована для создания калиброванного импульсного источника непрерывного спектра с известным распределением энергии и температурой порядка $30\,000^\circ \text{ K}$, а также для изучения плазмы при высоких значениях

температуры и давления. Для этого разряда известны: плотность тока, давление, температура, химический состав газа и падение напряжения в разрядном промежутке.

Следует обратить внимание на возможность шунтирующих канал пробоев. Они вызываются мощным ионизирующим действием излучения вылетающих из отверстия факелов. Фотоионизация настолько велика, что вызывает пробой промежутков до 100 мм при напряжении порядка 1000 в.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Anderson, Astrophysical Journ., 64, 295, 1926.
- [2] М. П. Ванюков, А. А. Мак и Н. В. Паразинская, Оптика и спектроскопия, 1, № 5, 642, 1956.

В. П. ИВАНОВ, А. Л. ВАССЕРМАН,
А. А. БУКАРЕВА, В. П. ЖИЛЬЦОВ

СХЕМА ПИТАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП В РЕЖИМЕ ЧАСТО ПОВТОРЯЮЩИХСЯ ВСПЫШЕК

(Реферат доклада)

При различных кинематографических и стробоскопических исследованиях, производимых с применением импульсных источников света, импульсные лампы должны работать в режиме периодически повторяющихся вспышек с частотой от нескольких герц до нескольких десятков килогерц.

При частотах до нескольких сот герц большинство импульсных ламп может работать в обычной схеме без коммутации цепей (зарядной или разрядной). Получение больших частот в данной схеме затруднено тем, что скорость нарастания напряжения на рабочем конденсаторе становится соизмеримой со скоростью восстановления пробивной прочности импульсной лампы, в результате чего лампа впадает в режим стационарного горения, а зарядное сопротивление выполняет функцию балласта.

Максимальную частоту вспышек при заряде рабочего конденсатора через сопротивление удастся получить при условии приблизительно линейного нарастания напряжения на рабочем конденсаторе, т. е. при условии, когда

$$RC > \frac{1}{f},$$

где R — сумма зарядного сопротивления и выходного сопротивления источника питания (в омах),

C — емкость рабочего конденсатора (в фарадах),

f — частота вспышек (в герцах).

Для получения более высоких частот следования вспышек необходимо снять с электродов импульсной лампы разность потенциалов сразу же после вспышки, так как в этом случае лампа быстрее восстанавливает свою электрическую прочность. Это может быть достигнуто включением в зарядную цепь механического, электронного или ионного коммутатора, а для получения еще более высоких частот — включением в разрядную цепь лампы водородного тиратрона или разрядника. Частота вспышек лампы в таких схемах может достигать десятков килогерц.

Авторами были разработаны три схемы питания импульсных ламп с коммутацией в зарядной цепи.

Схема, разработанная Ивановым, позволяет включать стеклянные лампы малой мощности с частотой в несколько килогерц. В схеме осуществляется коммутация анодного напряжения, величина которого может достигать 1 кв. В цепь зарядки конденсатора включен триод, который запирается сразу же после пробоя импульсной лампы на промежуток времени до 60% всего периода.

В схеме, разработанной Вассерманом и Букаревой, триод включен параллельно рабочему конденсатору лампы. Он открывается сразу же после пробоя импульсной лампы, ограничивая нарастание напряжения на конденсаторе.

Эти две схемы синхронизируются задающим генератором импульсов.

Схема, разработанная Жильцовым, позволяет питать мощные импульсные лампы с частотой до нескольких килогерц. Мощный генераторный триод, включенный в цепь зарядки рабочего конденсатора, запирается мультивибратором на время паузы тока сразу же после вспышки импульсной лампы.

М. Г. ФЕЙГЕНБАУМ

О ПРИМЕНЕНИИ АККУМУЛЯТОРОВ ДЛЯ ПИТАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП

Принцип действия установок с импульсными лампами основан на накоплении энергии в течение сравнительно большого интервала времени между вспышками и быстрой реализации накопленной энергии в лампе за короткое время ее вспышки. Таким образом можно при небольшой средней мощности получать большие мощности в импульсе за счет очень малой длительности вспышки.

В установках с импульсными лампами в качестве накопителя энергии обычно используется батарея конденсаторов. Вследствие большого веса и объема, приходящихся на единицу запасаемой в конденсаторе энергии, установки с мощными импульсными лампами получаются тяжелыми и громоздкими, что является крупным недостатком, особенно для передвижных установок. В ближайшее время трудно ожидать большого снижения веса и объема конденсаторов на единицу запасаемой энергии, поэтому необходимы поиски других накопителей энергии, обладающих лучшими весовыми и габаритными характеристиками.

В качестве одного из возможных источников питания импульсных ламп может быть использована аккумуляторная батарея. В литературе нет данных о работе аккумуляторов в импульсном режиме, соответствующем работе импульсных ламп. С целью получения исходных данных для решения вопроса о возможности и целесообразности применения аккумуляторных батарей вместо конденсаторов для питания импульсных ламп автором было проведено экспериментальное исследование авиационных кислотных аккумуляторов типов 12А-30 и 12А0-50 и щелочных серебряно-цинковых аккумуляторов типа ЗСЦ-25. Аккумуляторы включались на серию импульсных разрядов при небольшом постоянном внешнем сопротивлении (0,005—0,1 ом). Время одного разрядного импульса τ составляло от 0,05 до 0,1 сек., интервалы между импульсами t — от 3 до 12 сек. Число разрядных импульсов в одной серии составляло от 200 до 10 000.

В процессе работы аккумуляторов в импульсном режиме исследовались: зависимость величины разрядного напряжения от величины разрядного тока, изменение напряжения в процессе разрядного импульса, изменение разрядного напряжения при большом числе разрядных импульсов, влияние величины интервалов между разрядами на работу аккумуляторной батареи и др. В таблице приведены итоговые данные о поведении аккумуляторных батарей при импульсном их включении, полученные при сопротивлении внешней цепи $R=0,005$ ом и числе разрядных импульсов $n=200$.

В импульсном режиме при больших разрядных токах (до 800 а для 12А-30, 1360 а для 12А0-50 и 225 а для ЗСЦ-25) начальное и среднее раз-

Тип аккумулятора	Число элементов	Напряжение без нагрузки (U_0)	Начальное разрядное напряжение (U_p)	Разрядное напряжение 200-го импульса (U_{200})	$\Delta U = \frac{U_0 - U_p}{U_0}$	$\frac{\Delta U_p}{U_p} = \frac{U_p - U_{200}}{U_p}$	Среднее разрядное напряжение ($U_{p-ср.}$)	Средний разрядный ток ($I_{p-ср.}$)	Энергия за импульс одного элемента (А)	Вес одного элемента (Р)	$\frac{P}{A}$
12А-30	1	2,2 в	1,58 в	1,38 в	0,28	0,13	1,47 в	268 а	32 Дж	2290 г	72 г/дж
	3	6,2	2,70	2,35	0,55	0,13	2,52	617	41	2290	56
	5	12,4	3,82	3,50	0,69	0,08	3,66	720	38	2290	60
	9	19,2	5,30	4,30	0,72	0,05	4,80	800	34	2290	68
12А0-50	1	2,13	1,62	1,61	0,24	0,006	1,61	442	57	4330	76
	3	6,6	4,18	4,04	0,37	0,034	4,11	770	85	4330	51
	6	12,9	6,40	5,54	0,50	0,13	5,97	920	74	4330	59
	9	19,8	7,49	6,92	0,62	0,08	7,20	1360	87	4330	50
ЗСЦ-25	1	1,80	0,59	0,54	0,67	0,08	0,56	148	8,25	293	35,5
	3	5,5	1,30	1,30	0,76	—	1,30	230	10	293	29,3
	6	11,0	1,55	1,40	0,86	0,09	1,48	225	5,55	293	53,0
	9	16,2	1,6	1,6	0,90	—	1,6	207	3,70	293	79,0
	12	22	1,97	1,8	0,91	0,09	1,88	204	3,2	293	92

рядное напряжение аккумулятора значительно меньше соответствующих номинальных значений (при 10-часовом, 3-часовом и 5-минутном режимах) и продолжает уменьшаться с увеличением разрядного тока. Главной причиной этого является, по-видимому, весьма значительное падение напряжения на внутреннем сопротивлении аккумулятора. Поэтому при разрядке аккумулятора для импульсного режима работы особое внимание следует обращать на уменьшение внутреннего сопротивления аккумулятора.

Кривые разрядного напряжения и тока имеют П-образную форму; изменение напряжения и тока за время одного разрядного импульса в исследованных аккумуляторах не превышает в большинстве случаев 5%. Изменение величины интервала между разрядными импульсами в пределах 3 ÷ 12 сек. практически не влияет на ход кривой разрядного напряжения. Время восстановления э.д.с. вполне обеспечивает возможность получения практически любого интервала времени между разрядными импульсами, который может оказаться необходимым в установках с мощными импульсными лампами.

При двух сериях импульсных разрядов ($n=200$) с интервалами между сериями в полчаса (без подзаряда) начальное и среднее разрядное напряжение второй серии практически не отличаются от соответствующих значений первой серии: за время «отдыха» аккумулятора э.д.с. его восстанавливается. При значительном увеличении разрядного тока емкость аккумулятора резко снижается. Это является следствием отставания процесса диффузии от процесса разряда, образования сульфата на поверхности пластин, роста э.д.с. поляризации и внутреннего сопротивления аккумулятора.

Емкость аккумулятора по энергии

$$A = \int_0^t U I dt$$

в еще большей степени зависит от режима разряда, так как с увеличением величины разрядного тока уменьшается среднее разрядное напряжение. Перерывы в работе повышают емкость аккумулятора, так как за время перерыва происходит восстановление э.д.с. и диффузия электролита восстанавливает концентрацию электролита в порах.

Для импульсного режима работы при $\tau = 0,05 \div 0,1$ сек. и $t = 3 \div 12$ сек. перерывы получаются относительно большими, и можно ожидать, что при работе в импульсном режиме значения емкости будут больше, чем в случае непрерывной работы при таком же токе нагрузки.

Из таблицы видно, что вес аккумулятора, отнесенный к единице энергии, расходуемой в одном импульсе, при работе в импульсном режиме ($\tau = 0,05 \div 0,1$ сек., $t = 3 \div 5$ сек., $n = 200$ при токах нагрузки, в 100 ÷ 300 раз превышающих ток 10-часового разряда) составляет: для 12А-30 56 ÷ 72 г/дж, для 12А0-50 50 ÷ 76 г/дж и для ЗСЦ-25 29,3 ÷ 92 г/дж.

Приведенные в таблице данные получены для серии разрядов при $n=200$ и $R=0,005$ ом. Между тем, как было указано выше, при работе в импульсном режиме до понижения напряжения на 20% при $R=0,005$ ом от аккумулятора 12А-30 получено 700 разрядных импульсов, от 12А0-50 — более 1000 импульсов (причем в последнем случае напряжение снизилось только на 16%), а для аккумулятора ЗСЦ-25 — 1150 импульсов.

Таким образом, при серии $n=200$ (что является в некоторых случаях вполне достаточным) мы в указанных выше случаях имеем запас ем-

кости: для 12А-30 3,5-кратный, для 12А0-50 более чем 5-кратный и для ЗСЦ-25 5-кратный.

Если учесть, что для напряжения порядка 5 ÷ 6 в (что соответствует трем элементам аккумулятора) более вероятным является соответствующее сопротивление внешней цепи порядка $R=0,01$ ом, то получаем запас емкости: для 12А-30 17,5-кратный, для ЗСЦ-25 30-кратный.

Даже если принять, что вес аккумуляторов можно уменьшить только в 5 раз, мы получим значения веса на единицу расходуемой энергии: для 12А-30 11 г/дж и для ЗСЦ-25 6 г/дж.

Следует ожидать, что при разработке аккумуляторной батареи, предназначенной специально для работы в импульсном режиме, можно будет получить еще большее снижение веса аккумулятора, приходящегося на единицу расходуемой в одном импульсе энергии. Для бумажно-масляных импульсных конденсаторов мы имеем величину 35 ÷ 50 г/дж. Разработанные в последнее время электролитические конденсаторы имеют значительно лучшие весовые характеристики, но их существенными недостатками являются большие потери, недолговечность и др.

Надо иметь в виду, что необходимым элементом установок с конденсаторами является агрегат питания, наличие которого существенно увеличивает общий вес установки, тогда как в установках с аккумуляторной батареей нет необходимости в агрегате питания.

Таким образом, можно считать достаточно очевидным, что разработка специальных импульсных аккумуляторов для применения их вместо конденсаторов в некоторых установках с импульсными лампами позволит значительно уменьшить вес таких установок и что возможность решения этой задачи в ближайшее время является в достаточной степени реальной.

И. М. ГУРЕВИЧ

ГРАДУИРОВКА ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ МОДУЛЯЦИИ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИМПУЛЬСНЫЙ ФОТОМЕТР УИФ-1

Измерительные схемы с фотоэлементами применяются для регистрации кратковременных вспышек уже около тридцати лет [1].

Фотоэлектрические приборы, применяемые в настоящее время для регистрации световых импульсов, можно разделить на две группы: приборы, использующие фотоумножитель или фотоэлемент совместно с кагодным осциллографом, и приборы с накоплением заряда на конденсаторе [2]. Схемы с конденсатором могут быть проградуированы в величинах световой энергии, но не дают никаких сведений о временном ходе исследуемого излучения и его интенсивности в любой момент времени. Таков, например, прибор, описанный Эджертоном в 1946 г., и интегральный свечемер ФМ-33а [2].

В 1955 г. разработан импульсный фотометр УИФ-1, представляющий собой разновидность схемы «фотоумножитель—импульсный осциллограф».

Все блоки этого прибора, включая импульсный осциллограф, разработаны специально для измерения излучения световых вспышек длительностью от 0,5 мксек до 4 мсек. Однако наличие измерительного прибора постоянного тока, включенного в анодную цепь фотоумножителя, позволяет использовать фотометр и для исследования непрерывно действующего излучения постоянной интенсивности.

Нелинейные динамические искажения в канале сигнала сведены к минимуму. Только при высоте осциллограммы 60 мм (в одну сторону) появляются небольшие амплитудные искажения (до 5%).

Усилитель вертикального отклонения рассчитан по методу Брауде; монтажные емкости предельно снижены. Поэтому большое выходное напряжение сочетается с малыми искажениями по высокой частоте.

Так, при подаче на вход осциллографа импульса длительностью $\tau = 1$ мксек. с фронтом $\tau_f = 0,07$ мксек. удлинение фронта импульса не превышает 0,1 мксек., амплитуда первого выброса составляет 4—5%.

Фотографическая скорость записи равна 100 км/сек., хотя на выходе стоит стандартная электронно-лучевая трубка 13-ЛО-36. Это достигнуто за счет улучшений в схеме подсвечивающего импульса.

Приемником излучения служит фотоэлектронный умножитель с висмутцециевым катодом. В комплект приемного устройства входит фильтр, корректирующий кривую спектральной чувствительности катода под среднюю кривую дневной видности и набор интерференционных фильтров ИСФ в области 400—700 мкм. Это дает возможность проводить измерения мгновенного лучистого потока в дюменах и ваттах на миллимикрон. Чув-

ствительность фотометра по световому потоку на входе прибора составляет величину не менее 20 мкклм и в энергетических единицах не менее 10^{-8} вт на 1 ммк вертикального отклонения луча.

Прибор имеет 4 диапазона ждущей развертки. Градуировка времени осуществляется калибрационными метками 0,5; 1; 5; 20; 100 мксек.

Основная особенность прибора УИФ-1, отличающая его от всех аналогичных измерительных устройств, заключается в применении для градуировки интенсивности световых импульсов электронной модуляции приемника излучения [3]. Как известно, градуировка измерительных устройств, предназначенных для измерений излучения световых вспышек, производится, обычно, путем освещения приемника световыми импульсами, которые создаются посредством механической модуляции потока эталонного источника света.

Серия импульсов образуется, как правило, вращающимся диском с прорезью, одиночный импульс — маятниковым или другим механическим затвором.

Новый принцип градуировки, осуществленный в импульсном фотометре УИФ-1, дает возможность градуировать по интенсивности осциллограммы световых импульсов без применения механической модуляции света эталонной лампы. Для этого на первый каскад фотоэлектронного умножителя подается отрицательный импульс напряжения, достаточный для полного запираания анодного тока умножителя. При этом фотокатод непрерывно освещается эталонной лампой. В выходную цепь фотоумножителя введено два равных по величине нагрузочных сопротивления. Благодаря этому удается осуществить подачу на вход осциллографа отрицательного импульса напряжения как при засветке фотокатода световым импульсом, так и при освещении его эталонной лампой, сохранив при этом неизменной чувствительность схемы. Высота прямоугольного импульса, появляющегося на осциллографе при запираании анодного тока, вызванного излучением эталонной лампы, дает масштаб по ординате в люменах или в ваттах на миллимикрон.

Имея осциллограмму силы света или яркости импульсного источника света, проградуированную по обеим координатным осям, можно определить мгновенные значения этих величин непосредственно, а суммарные за импульс — планиметрированием осциллограммы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. Ф. Форсайт. Методы измерения температуры, ч. II. Изд. иностр. лит., 378, 1957.
- [2] Ю. М. Кутев. Электричество, № 1, 67, 1955.
- [3] И. М. Гуревич, Авт. свид., № 102870, класс 42 h 1702.

Ю. М. КУТЕВ

НОВАЯ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО СВЕЧЕМЕРА

Новая модель импульсного свечемера предназначена для измерения освечивания (интеграла от силы света по времени) импульсных ламп, ламп-фотовспышек и других источников света кратковременного действия. В основу работы прибора положен телецентрический метод измерения силы света. Телецентрическая оптическая система состоит из объектива, в фокальной плоскости которого расположена диафрагма.

Такая система выбирает из всего множества лучей, исходящих от источника, расположенного перед объективом, только пучки лучей, параллельные оптической оси системы и ограниченные телесным углом, равным отношению площади диафрагмы к квадрату фокусного расстояния объектива. Световой поток, прошедший за диафрагму, будет в этом случае пропорционален силе света источника в направлении оптической оси системы и не будет изменяться при перемещении источника в некоторых пределах перед объективом системы. Таким пределом является боковая поверхность конуса, основанием которого служит объектив, а угол при вершине равен углу, под которым видна диафрагма из центра объектива. Чем меньше этот угол, тем больше пространство, в котором может быть помещен измеряемый источник, тем выше избирательность прибора, но тем ниже его чувствительность. В настоящей модели этот угол равен $\sim 1^\circ$.

Для измерения освечивания импульсных ламп за диафрагмой оптической системы расположен конденсор, который проектирует диафрагму на молочное стекло, расположенное перед вакуумным сурьмяно-цезиевым фотоэлементом. Последовательно с фотоэлементом включен конденсатор. При вспышке импульсной лампы конденсатор заряжается до разности потенциалов, пропорциональной освечиванию лампы. Разность потенциалов измеряется ламповым вольтметром с высокоомным входом. Спектральная чувствительность сурьмяно-цезиевого фотоэлемента приведена к стандартной чувствительности светлоадаптированного глаза с помощью специального светофильтра. Для расширения пределов измерения между фотоэлементом и конденсатором вводятся нейтральные светофильтры с плотностями $\sim 1, 2, 3, \text{ и } 4$.

Для градуировки прибора в абсолютных величинах освечивания он снабжен контрольным осветителем, который состоит из лампы накаливания, питаемой пониженным стабилизированным напряжением, и диска с секторным вырезом, приводимым во вращение синхронным мотором. Для наводки прибора на удаленный объект служит оптическая насадка, надеваемая на оправу объектива. Насадка состоит из зеркала, наклоненного на 45° по отношению к оптической оси прибора, и плоско-параллельной пластинки. Наводка осуществляется совмещением центра объекта с центрами перекрестий, нанесенных на зеркале и пластинке.

Новая модель импульсного свечемера, имеющая марку ИСМ-57, позволяет измерять освечивание импульсных ламп с наибольшим размером светящего объема до 200 мм, если лампа расположена вблизи объектива, и до 150 мм при удалении ее на 2 м. Весь диапазон измерений прибора от ~ 1 до $\sim 500\,000$ св·сек. рассчитан на длительности вспышек импульсных ламп от 10 мксек. до 1 сек. Класс прибора — 2,5. Питание производится от сети переменного тока напряжением 220 в и частотой 50 гц. Импульсный свечемер ИСМ-57 предназначен для серийного выпуска.

Г. М. ГРАЧЕВА, Л. Н. ЗАКГЕЙМ и В. Ф. САФОНОВ

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ УСТАНОВОК ИМПУЛЬСНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Широкое использование газоразрядных ламп импульсного действия для целей фотографии и сигнализации привело к разработке специальных конденсаторов с малым значением удельного объема по запасенной энергии.

Приближенное значение теоретической величины удельного объема, определяемого по количеству запасенной энергии, выражается уравнением

$$v_{уд.} = \frac{2V}{U_p^2 C} \cdot 10^6 = 22,6 \cdot 10^{12} \frac{1}{\epsilon \cdot E_p^2}, \quad (1)$$

где V — объем конденсатора (в см³), U_p — рабочее напряжение (в в), C — емкость (в мкф), E_p — рабочая напряженность поля в диэлектрике конденсатора (в в/см), ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика и $v_{уд.}$ — удельный объем (в см³/дж). Уравнение (1) показывает, что наименьшее значение удельного объема можно получить в конденсаторах с возможно более высоким значением ϵ и E_p .

Среди диэлектриков, применяемых в настоящее время, наиболее подходящим для этой цели является конденсаторная бумага, пропитанная полярными веществами. При работе конденсаторов в схемах питания импульсных ламп величина рабочей напряженности поля в пропитанном бумажном диэлектрике может быть установлена достаточно высокой, однако не выше чем $5 \div 6 \cdot 10^5$ в/см. Эффективное значение диэлектрической проницаемости бумаги в конденсаторе, пропитанном полярным жидким составом (соволом), равно 5.

Для удельной емкости конденсатора с таким диэлектриком, согласно уравнению (1), получим $v_{уд.} = 12,5$ см³/дж. Учитывая высокое значение рабочей напряженности поля, изоляция конденсатора должна быть осуществлена не менее чем в 3—4 слоя бумаги. Если будет использована тонкая конденсаторная бумага (толщиной в 8 мк), общая толщина диэлектрика в конденсаторе составит $24 \div 32$ мк и рабочее напряжение конденсатора будет 1 500—2 000 в. Проведенный расчет показывает, что при использовании бумажных конденсаторов наилучший удельный объем, который может быть достигнут при рабочих напряжениях не менее 1 500 в, составляет 12,5 см³/дж.

Другим подходящим конденсатором, который должен быть рассмотрен как малогабаритный накопитель энергии для схем с импульсными лампами, является алюминиевый электролитический конденсатор.

Расчеты показывают, что электролитические конденсаторы представляют весьма существенные преимущества по весам и габаритам на единицу запасаемой энергии по сравнению с бумажными конденсаторами. Следует отметить, что удельные объемы реальных конденсаторов больше,

чем вычисленные, так как при вычислении теоретических объемов не учитываются коэффициенты заполнения корпусов, изоляция от корпуса, размеры изоляторов и пр., однако соотношение объемов разных конденсаторов приблизительно сохраняется.

При сопоставлении электролитических конденсаторов с бумажными и другими для работы в схемах импульсных ламп следует учитывать специфические особенности режима работы конденсаторов в этих схемах. Характерным для таких схем является периодически повторяющийся заряд конденсаторов до номинального рабочего напряжения и разряд на малое сопротивление. Если для бумажных и других конденсаторов такой режим работы не ведет к сколько-нибудь существенным изменениям характеристик со временем, то в электролитических конденсаторах, изготовленных по обычной технологии, повторяющиеся разряды на малое сопротивление вызывают постепенное уменьшение емкости и запасаемой в конденсаторе энергии.

Такое своеобразное «старение» электролитических конденсаторов связано с тем, что обычно катодная пластина конденсатора изготавливается из алюминиевой фольги. При разрядах на малые сопротивления разрядные токи, протекающие в конденсаторе, вызывают окисление катодной пластины и образование на ее поверхности оксидного слоя, создающего емкость, включенную последовательно с емкостью анодной пластины.

Если обозначить емкость анодной пластины через C_a и емкость катодной пластины через C_k , то общая емкость конденсатора

$$C = \frac{C_a C_k}{C_a + C_k}. \quad (2)$$

Из уравнения (2) видно, что емкость $C = C_a$, когда $C_k \gg C_a$. Такое условие удовлетворяется только в свежизготовленном конденсаторе, в котором толщина оксидного слоя на катоде исчезающе мала. С течением времени эксплуатации толщина оксидного слоя на катоде растет и емкость C_k уменьшается, вследствие чего уменьшается и C . Для устранения «старения», связанного с окислением катода при разрядах, оказалось целесообразным применение в конденсаторах для импульсных ламп катодов из неокисляющихся материалов. Испытания конденсаторов с катодами из свинцово-оловянной фольги, на поверхности которой не возникает диэлектрического оксидного слоя, полностью подтвердили это положение.

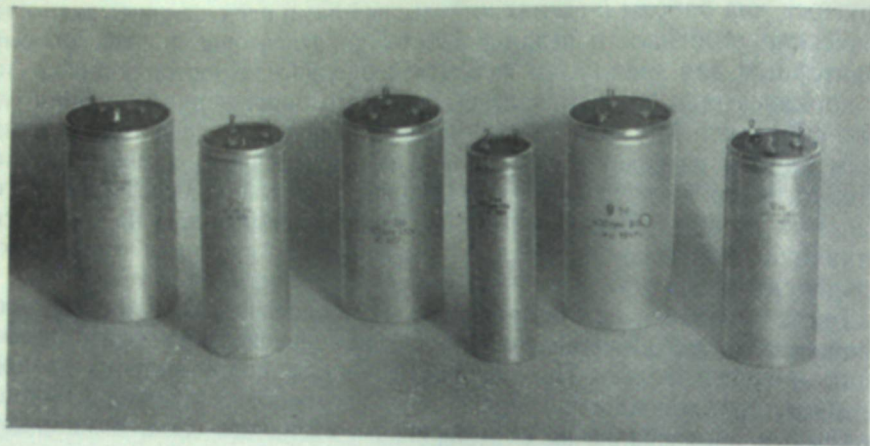
В табл. 1 приведены данные о зависимости емкости от числа циклов зарядов-разрядов электролитических конденсаторов с катодами из алюминиевой и свинцово-оловянной фольги.

Таблица 1

Емкость (в % к начальной емкости) после соответствующего числа циклов

Номинал	Число циклов						Материал катода
	2500	5000	7500	10000	15000	30000	
1500 мкф, 130 в	52	43	38	37	—	—	} Алюминиевая фольга Свинцово-оловянная фольга
1500 мкф, 200 в	68	59	59	48	—	—	
1500 мкф, 130 в	100	98	98	98	98	98	
1500 мкф, 200 в	100	99	99	99	—	—	

Таблица 1 показывает, что применение катодов из свинцово-оловянной фольги радикально устраняет «старение», вызванное окислением катода. В соответствии с полученными результатами оказалось целесообразным разработать специальную серию электролитических конденсаторов



для импульсных ламп. В настоящее время такая серия разработана и обозначена наименованием «тип ЭФ». В состав этой серии вошли конденсаторы с номинальными характеристиками и габаритами, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Номинал		Размеры			Энергия	Удельный объем	Вес на 1 дж запас. энергии
напряж.	емкость	диам.	высота	объем			
500 в	400 мкф	65 мм	115 мм	382 см ³	50 дж	7,6 см ³ /дж	10,8 г
300	1300	65	115	382	58,5	6,5	9,25
300	800	50	115	226	36	6,3	11,0
200	1500	50	115	226	30	7,5	13,3
130	1500	40	115	145	12,7	11,4	22,0

Внешний вид конденсаторов типа ЭФ представлен на фотографии. Конденсаторы типа ЭФ получают все более широкое распространение. Разработанные и частично освоенные в настоящее время в производстве конденсаторы типа ЭФ являются первыми конденсаторами такого назначения. Серия эта получит, по-видимому, в близком будущем дальнейшее развитие.

К. Е. МЕДВЕДЕВ

ИМПУЛЬСНЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

(Реферат докладов)

Существующие высоковольтные керамические конденсаторы типа КВКТ, КВКГ, КВКБ, КБЭ и другие часто не могут быть непосредственно использованы в схемах питания импульсных источников света из-за присутствия им ряда недостатков как электрического, так и конструктивного характера. В связи с этим приобретает особую актуальность разработка новых высоковольтных керамических конденсаторов, способных работать в условиях импульсного режима. В докладе рассмотрены основные требования электрического и конструктивного характера, предъявляемые к высоковольтным керамическим конденсаторам, предназначенным для работы в генераторах для питания импульсных источников света.

Приводятся основные методы конструирования импульсных высоковольтных керамических конденсаторов, оценивается влияние поверхностной емкости на разрядные напряжения по поверхности, а также рассматриваются способы уменьшения индуктивности конденсаторов.

Дается обзор свойств новых высоковольтных керамических конденсаторов типа КВС, КВБ, КВД, КВГ, КВЦ и КВК способных работать в импульсном режиме.

М. М. БУТСЛОВ

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВЕРХБЫСТРЫХ ПРОЦЕССОВ

Электронно-оптическим преобразователем называется электронный прибор, в котором световое оптическое изображение преобразуется в изображение электронное и затем снова в световое. Преобразователь имеет фотокатод, с которого под действием света вырываются электроны, электронно-оптическую фокусирующую систему, с помощью которой осуществляется фокусировка электронов и флуоресцирующий экран, который преобразует электронное изображение в световое. К электродам преобразователя прикладывается напряжение порядка 20 кв.

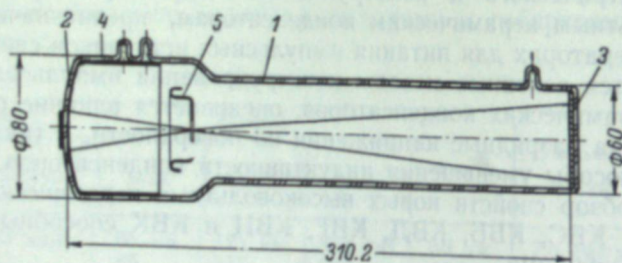


Рис. 1. Электронно-оптический преобразователь для однокадровой импульсной фотосъемки ПИО-1.

На рис. 1 представлена схема устройства электронно-оптического преобразователя с электростатической фокусировкой (ПИО-1) для однокадровой фотосъемки быстро протекающих процессов. Преобразователь состоит из цилиндрической стеклянной колбы 1, на плоских торцовых стенках которой расположены фотокатод 2 и флуоресцирующий экран 3. Электроны, вылетевшие из какой-либо точки фотокатода, фокусируются снова в соответствующую точку на экране с помощью двухэлектродной электростатической линзы, образованной проводящими слоями фотокатода 2, металлизированным слоем 4, соединенным с катодом и фокусирующей диафрагмой 5. Изображение исследуемого объекта с помощью световой оптики проектируется на фотокатод, а между фотокатодом и фокусирующей диафрагмой подается прямоугольный импульс напряжения амплитудой $15 \div 20$ кв. Такие преобразователи имеют электронно-оптическое увеличение $2:1$ и разрешающую силу на оси, отнесенную к фотокатоду, $60 \div 70$ штрихов на миллиметр. С помощью описанного преобразователя Е. К. Завойским еще в 1949 г. впервые было проведено фотографирование с выдержками порядка 10^{-7} сек.

Основными недостатками таких преобразователей является то, что, во-первых, они позволяют получать только один снимок при весьма труд-

ных условиях осуществления П-образного, весьма короткого импульса напряжения амплитудой в 20 кв, и, во-вторых, что самое главное, при указанном импульсном режиме питания преобразователи работают нестабильно. Аналогичные результаты были получены на немецких трехэлектродных преобразователях [1].

Наиболее интересным является создание преобразователя, который позволял бы получать последовательный ряд снимков процесса, протекающего за время $10^{-7} \div 10^{-8}$ сек. Для решения поставленной задачи необходимо перемещать изображение по экрану преобразователя с переменными во времени скоростями от 10^6 до 10^{10} см/сек. В литературе имеется указание на то, что для получения ряда последовательных снимков можно использовать отклоняющие магнитные поля [1]. Однако указанный интервал изменения скорости развертки практически невозможно

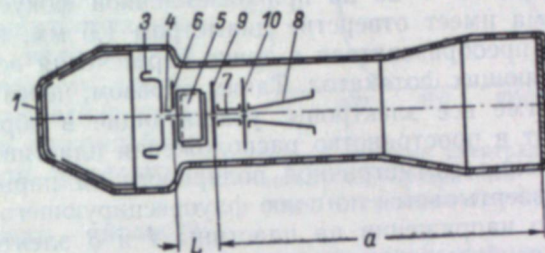


Рис. 2. Импульсный электронно-оптический преобразователь для многокадровой фотосъемки типа ПИМ-3.

осуществить с помощью магнитных катушек из-за наличия в них большой индуктивности. Кроме того, при движении электронного изображения по экрану резко уменьшается контраст изображения вследствие наложения движущегося изображения на неподвижное в процессе перемещения изображения с одного места экрана на другое. Это явление будет сказываться меньше в том случае, если время перемещения изображения по экрану будет значительно меньше времени нахождения изображения на экране в неподвижном состоянии. Снижение контраста можно полностью устранить, если на время перемещения изображения закрыть доступ электронов на экран. Однако осуществить такой затвор с использованием только магнитных катушек практически невозможно.

Как показала практика, поставленная задача полностью решается, если для развертки изображения в преобразователе применить электростатические поля, как это осуществляется при развертке по экрану электронного луча в электронно-лучевых трубках, а на время переноса изображения кадра с одного места экрана на другое закрывать электронам доступ на экран преобразователя. Для выполнения этого условия многокадровый импульсный электронно-оптический преобразователь должен иметь для развертки изображения две пары пластин, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях, и быстродействующий электронный затвор, обеспечивающий в процессе записи неподвижное положение изображения кадра на экране.

На рис. 2 приведена схема устройства импульсного многокадрового электронно-оптического преобразователя, в котором осуществлены электростатическая развертка изображения и электростатический электронный затвор. Как видно из рисунка, устройство импульсного многокадрового преобразователя отличается от однокадрового тем, что за фокуси-

рующей диафрагмой 3 расположены четыре пары отклоняющих пластин 4, 5, 7 и 8 и три экранирующие пластины с щелевыми отверстиями 6, 9 и 10. В пространстве расположения отклоняющих и экранирующих пластин электронный луч имеет относительно малое поперечное сечение вследствие того, что используемая для фокусировки электронов электростатическая линза в пространстве расположения диафрагмы 3 обеспечивает сбор электронов в точку «кроссовер», благодаря чему изображение на флуоресцирующем экране получается перевернутым по отношению к изображению на фотокатоде. Наличие на оси преобразователя «кроссовера» диаметром меньше 1 мм и позволяет осуществить развертку и записывание изображения с помощью электростатических полей.

В рабочем состоянии между фотокатодом 1 и фокусирующей диафрагмой 3 в многокадровом импульсном преобразователе подается постоянное напряжение 18 ÷ 20 кв при заземленной фокусирующей диафрагме. Диафрагма имеет отверстие диаметром 1,5 мм, которое располагается на оси преобразователя в точке пересечения всех траекторий электронов, покидающих фотокатод. Таким образом, через указанное отверстие в диафрагме все электроны, участвующие в образовании изображения проходят в пространство расположения пластин. Подацией импульсного напряжения симметричной полярности на пары пластин 5 и 7 изображение развертывается по полю флуоресцирующего экрана, а подацией импульсного напряжения на пластины 4 и 8 электронный пучок смещается с оси преобразователя, выводится из щели диафрагмы 6 на ее поверхность, и тем самым закрывается доступ электронов на флуоресцирующий экран. Как известно, величина отклонения электронного луча A плоско-параллельными пластинами определяется соотношением:

$$A = \frac{1}{2} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{U_1}{U_2} \cdot L,$$

где l — длина пластин (в мм),
 d — расстояние между пластинами (в мм),
 U_1 — отклоняющее напряжение (в вольтах),
 U_2 — ускоряющее напряжение (в вольтах),
 L — расстояние между пластинами и экраном (в мм).

Величина $\frac{A}{U_1} = \alpha$ определяет чувствительность отклоняющего устройства.

При надлежащем выборе размера пластин 4 и 8 затвора и их взаимного расположения можно добиться того, что их чувствительности окажутся равными. В этом случае, подавая на пластины затвора импульсное напряжение, равное по величине, но противоположное по полярности, удается обеспечить неподвижность изображения в процессе его записывания.

Каждая пара отклоняющих и запирающих пластин экранирована друг от друга металлическими пластинами, чем обеспечивается отсутствие воздействия поля одной пары пластин на поле других, а также обеспечивается изоляция поля пластин от фокусирующего поля в пространстве «фотокатод — диафрагма».

Наличие в преобразователе быстродействующей развертывающей и запирающей систем позволяет осуществить ряд последовательных снимков процесса, протекающего за чрезвычайно короткие интервалы времени практически без потери контраста изображения. Последнее достигается благодаря наличию быстродействующего затвора, обеспечивающего неподвижность изображения в процессе его записывания и отсутствие изображения на экране в процессе переноса кадра с одного места экрана на другое.

Описанные импульсные многокадровые электронно-оптические преобразователи имеют шифр ПИМ-3 и ПИМ-4 и отличаются друг от друга размером экрана и степенью электронно-оптического увеличения. Чувствительность первой пары отклоняющих пластин для ПИМ-3 составляет 41 в/мм, второй пары 45 в/мм и чувствительность пластин затвора 56 в/мм при ускоряющем напряжении 18 кв. Для преобразователя типа ПИМ-4 чувствительность первой пары отклоняющих пластин соответствует 20 в/мм, второй пары — 23 в/мм и чувствительность пластин затвора 28 в/мм при ускоряющем напряжении 18 кв.

Одной из важнейших характеристик импульсных преобразователей является их коэффициент яркости, характеризующий отношение яркости экрана (в апостильбах) к освещенности фотокатода (в люксах).

Коэффициент яркости преобразователя η_B связан с другими его характеристиками соотношением

$$\eta_B = \frac{\pi \varphi \gamma U}{m^2},$$

где φ — чувствительность фотокатода (в а/лм),
 γ — светоотдача экрана (в св/вт),
 U — рабочее напряжение (в вольтах),
 m — электронно-оптическое увеличение.

Для импульсных электронно-оптических преобразователей типа ПИО-1 и ПИМ-3 с сурьмяно-цезиевым фотокатодом коэффициент яркости имеет величину около 16, а для ПИМ-4 около 4. Для этих же преобразователей, но с кислородно-цезиевым фотокатодом коэффициент яркости соответственно равен 8 и 2.

Из приведенных данных следует, что импульсные преобразователи обеспечивают некоторое усиление света, что является весьма существенным преимуществом электронно-оптического метода фотографирования быстропротекающих явлений. Вторым весьма важным преимуществом преобразователя является его чувствительность в широком спектральном диапазоне.

На рис. 3 представлены спектральные характеристики кислородно-цезиевого (1) и сурьмяно-цезиевого фотокатодов (2). Из кривых видно, что сурьмяно-цезиевый фотокатод имеет максимум чувствительности в области 430 мкм, а кислородно-цезиевый — в области 750 ÷ 800 мкм.

Кроме того, сурьмяно-цезиевый фотокатод имеет значительную чувствительность до $\lambda = 250$ мкм, которая может быть использована в случае нанесения фотослоя на стекло, прозрачное в ультрафиолетовой области спектра. Таким образом, импульсные преобразователи позволяют производить фотографирование быстропротекающих процессов в широком диапазоне спектра, начиная примерно от 250 и кончая 1 200 мкм.

Наконец, весьма важную роль в импульсных преобразователях играет флуоресцирующий экран, характеристики которого определяют чувствительность преобразователя в целом. На рис. 4 представлено семейство кривых, характеризующее спектральное излучение шести типов люмино-

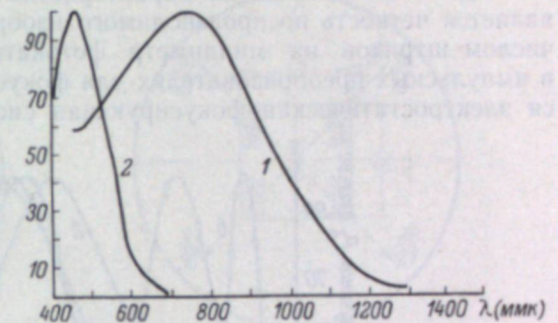


Рис. 3. Кривые спектральной чувствительности полупрозрачных кислородно-цезиевого и сурьмяно-цезиевого фотокатодов.

форов. Импульсные преобразователи должны иметь флуоресцирующий экран, излучение которого по спектру должно быть согласовано со спектральной чувствительностью используемой фотопленки. Наиболее эффективным люминофором для фотографирования является люминофор марки «ФС», характеризующийся кривой 4. Максимум излучения его находится в области 450 мкм.

Одной из важнейших характеристик импульсных преобразователей является четкость воспроизводимого изображения, которая определяется числом штрихов на миллиметр фотокатода. Как упоминалось ранее, в импульсных преобразователях для фокусировки электронов используется электростатическая фокусирующая система. В таких фокусирующих

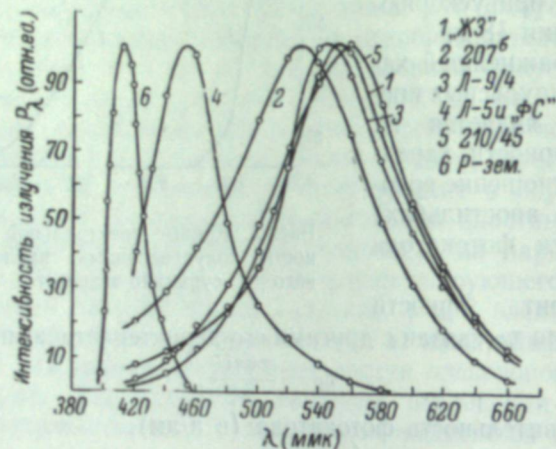


Рис. 4. Кривые спектрального излучения люминофоров.

1 — люминофор типа ЖЗ; 2 — 2076; 3 — Л-9/4; 4 — Л-5 и ФС; 5 — 210/45; 6 — Р-зем.

системах электроны, вышедшие из точки фотокатода, снова собираются в точку на экране с некоторым размытием, причем диаметр кружка размытия (в см) определяется выражением

$$\Delta = k \frac{v_0}{E},$$

где v_0 — начальная скорость электронов (в вольтах),

E — напряженность электрического поля у фотокатода (в в/см),

k — коэффициент, численно равный 1,2.

В свою очередь, в используемой конфигурации фокусирующих электродов напряженность электрического поля определяется выражением:

$$E = \frac{8U_n}{3D} + \frac{U}{D \ln \frac{D}{d}} - e^{-\frac{4,8}{D} L_k},$$

где U_n — потенциал на цилиндре вблизи фотокатода,

D — диаметр катодной колбы,

d — диаметр фокусирующей диафрагмы,

U — ускоряющее напряжение,

L_k — расстояние от катода до фокусирующей диафрагмы.

Импульсные преобразователи на оси имеют сравнительно высокую разрешающую силу (порядка 60—70 мм⁻¹) на катоде, но при перемещении от оси к краю четкость изображения падает. Преобразователь типа

ПИМ-3 имеет кадр изображения на экране размером 25×25 мм и рабочий диаметр экрана 70 мм. Преобразователь типа ПИМ-4 имеет экран диаметром 140 мм.

На рис. 5 представлен график, характеризующий минимальную разрешающую силу центрального кадра и кадров, отклоненных от центра на расстояние 30 мм, для преобразователя ПИМ-3, а на рис. 6 — для пре-



Рис. 5. График изменения разрешающей способности преобразователя ПИМ-3 при отклонении кадра изображения по экрану преобразователя.

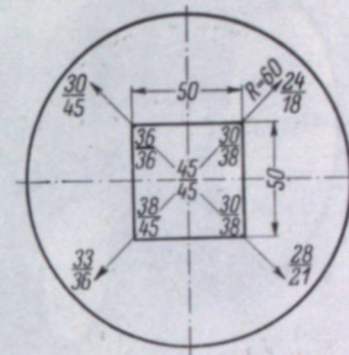


Рис. 6. График изменения разрешающей способности преобразователя ПИМ-4 при отклонении кадра изображения по экрану преобразователя.

образователя ПИМ-4 при отклонении кадра от центра на расстояние 60 мм. Из рис. 5 и 6 видно, что при отклонении кадра от центра на периферию четкость изображения уменьшается как в ПИМ-3, так и в ПИМ-4, однако даже на самом краю четкость еще остается сравнительно высокой.

Весьма важной характеристикой импульсного многокадрового преобразователя является величина искажения кадра при его отклонении от центра на периферию. На рис. 7 представлена фотография изображения мира, расположенного как в центре экрана преобразователя типа ПИМ-3, так и отклоненного на расстояние 30 мм от центра. Как видно из рис. 7, искажение изображения относительно мало и по абсолютному значению не превышает 5%. Импульсный преобразователь типа ПИМ-4 имеет еще меньшие искажения.

На рис. 8 представлена фотография импульсных электронно-оптических преобразователей типа ПИМ-3 и ПИМ-4.

Таким образом, наличие импульсных электронно-оптических преобразователей, позволяющих проводить исследование процессов, протекающих за время порядка 10⁻⁸ сек. с некоторым коэффициентом усиления яркости исследуемого объекта, является существенным достижением в области скоростной фотосъемки. Однако такими приборами можно успешно пользоваться для исследования быстрых процессов, протекающих с выделением довольно мощных потоков лучистой

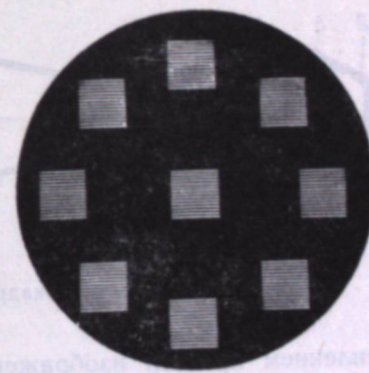


Рис. 7. Изображение мира при отклонении изображения на различные участки экрана.

энергии. Особую ценность представляют импульсные приборы, позволяющие производить фотографию сверхбыстрых процессов, протекающих с выделением весьма слабых потоков лучистой энергии.

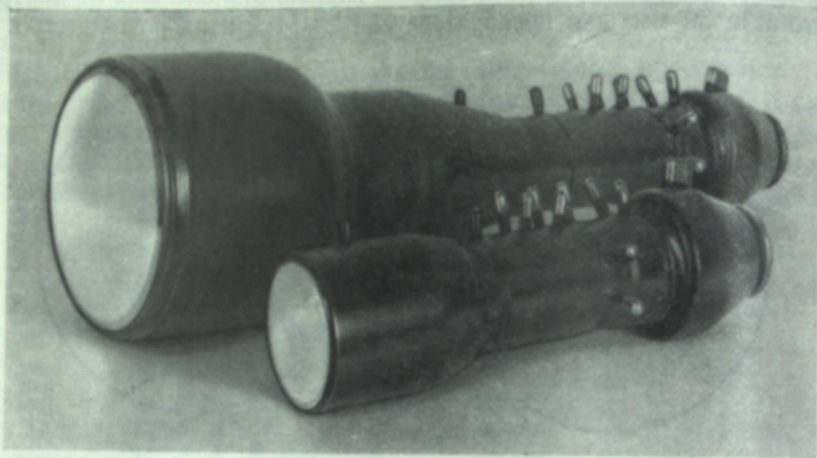


Рис. 8. Преобразователи ПИМ-3 и ПИМ-4.

Для получения изображения при слабых потоках лучистой энергии и коротких выдержках необходимо создание электронно-оптического преобразователя с очень высоким коэффициентом усиления яркости.

Для этих целей нами еще в 1952 г. создан специальный импульсный многокадровый электронно-оптический преобразователь с каскадным

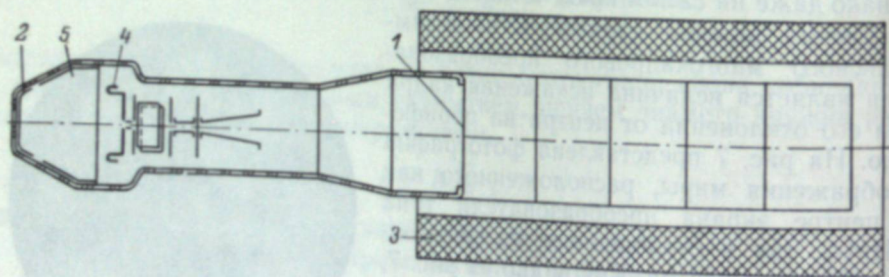


Рис. 9. Импульсный многокадровый электронно-оптический преобразователь.

усилением яркости изображения. Схематическое устройство одного из вариантов такого преобразователя представлено на рис. 9. Преобразователь состоит из входной камеры, представляющей собой устройство типа ПИМ-3, и нескольких усилительных каскадов, соединенных друг с другом посредством оптического контакта через тонкую прозрачную пленку. На одной стороне пленки наносится флуоресцирующий экран, а на другой — фотокатод. Фокусировка электронов в усилительных каскадах производится однородным магнитным полем соленоида 3. Во входной камере фокусировка осуществляется электростатическими полями. Фотокатод 2 и диафрагма 4 при соответствующих потенциалах образуют электростатическую линзу. Электрод 5 используется для более точной фокусировки электронов на экран 1. В области между фокусирующей диафрагмой и

экраном расположены две пары развертывающих пластин и пластины электронного затвора, аналогичные развертывающему и запирающему устройству, осуществленным в импульсных преобразователях ПИМ-3 и ПИМ-4.

В тех случаях, когда используются каскады усиления с малой инерцией, камера с устройством для развертки изображения располагается после усилительного тракта и изображение развертывается на выходном экране. Описанный многокадровый импульсный каскадный преобразователь имеет коэффициент усиления по электронам больше коэффициента усиления современных фотоэлектронных умножителей, разрешающую силу по экрану порядка 10 штрихов на 1 мм и обеспечивает уверенную фотографическую регистрацию единичного электрона, вылетевшего с входного фотокатода преобразователя.

Как показано в работах [2—6], проводившихся под руководством Е. К. Завойского, временное разрешение преобразователей достигает $10^{-12} \div 10^{-14}$ сек.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. S. Courtney-Pratt, Research, 2, 286, 1949.
- [2] Е. К. Завойский, Г. Е. Смолкин, А. Г. Плахов и М. М. Бутслов, ДАН СССР, 100, № 2, 242, 1955.
- [3] Е. К. Завойский, М. М. Бутслов, А. Г. Плахов и Г. Е. Смолкин, Атомная энергия, 4, 34, 1956.
- [4] Е. К. Завойский и Г. Е. Смолкин, Атомная энергия, 1, № 4, 46, 1956.
- [5] Е. К. Завойский и С. Д. Фанченко, ДАН СССР, 100, № 4, 661, 1955.
- [6] Е. К. Завойский и С. Д. Фанченко, ДАН СССР, 108, № 2, 218, 1956.
- [7] Е. К. Завойский, М. М. Бутслов и Г. Е. Смолкин, ДАН СССР, 111, 996, 1956.

М. М. БУТСЛОВ, Е. К. ЗАВОЙСКИЙ, А. Г. ПЛАХОВ,
Г. Е. СМОЛКИН, С. Д. ФАНЧЕНКО

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ФОТОГРАФИРОВАНИЯ СВЕРХБЫСТРЫХ ПРОЦЕССОВ

Известны два способа изучения быстропротекающих процессов средствами скоростного фотографирования. Первый способ заключается в получении одного или, что еще лучше, целой серии «мгновенных» снимков процесса за счет однократного или многократного открытия светового затвора на возможно более короткое время. При втором способе, называемом оптической хронографией, затвор оставляют открытым на протяжении всего времени развития процесса. Зато оптическое изображение заставляют во время экспозиции с возможно большей скоростью равномерно перемещаться по поверхности регистрирующей фотоэмульсии. Получающийся при этом «размазанный» снимок показывает изучаемый процесс развернутым во времени. Именно этот второй способ обладает наибольшим временным разрешением, и только он будет рассматриваться в настоящем докладе.

Оценим наивысшее временное разрешение оптической хронографии. При этом будем различать временное разрешение развертки $\tau_{\text{разв.}}$ и предельное временное разрешение объектива $\tau_{\text{пред.}}$. Временное разрешение развертки определяется чисто техническими причинами: скоростью движения изображения относительно фотослоя v и величиной геометрического разрешения δ (числом линий на см):

$$\tau_{\text{разв.}} = \frac{1}{\delta v}. \quad (1)$$

Предельное временное разрешение объектива определяется физическими причинами, связанными с процессом установления оптического изображения. Рассмотрим вначале идеализированный случай, когда безлинзовый зеркальный объектив, лишенный каких бы то ни было aberrаций, собирает в точку S' импульс света, испускаемый точечным источником. В широком интервале световых частот $\Delta\nu$, где коэффициент отражения зеркала мало отличается от единицы, прохождение света от S до S' , как это следует из принципа Ферма, ничего не меняет в соотношении фаз различных компонент световой вспышки. Искажение и удлинение сигнала пределами пропускаемого интервала $\Delta\nu$. Это ограничивает минимальную длительность сигнала, который может быть передан из S в S' , величиной

$$\tau_{\text{пред.}} \sim \frac{1}{\Delta\nu}. \quad (2)$$

Таким образом, наивысшее возможное временное разрешение оптической хронографии достигает 10^{-15} сек. Однако практически наличие aberrаций у применяемых объективов может значительно ухудшить эту величину. Нетрудно показать, например, что достаточно продольной сферической

aberrации 0,05 мм, чтобы ухудшить предельное временное разрешение объектива на два порядка.

Переход от чисто зеркальной оптики к линзовой вызывает дополнительное искажение и удлинение сигнала за счет хроматической aberrации, которая нарушает первоначальные фазовые соотношения между световыми компонентами различной частоты.

Не вдаваясь в дальнейшие подробности, можно сделать вывод, что при применении зеркальной оптики с достаточно малыми aberrациями может быть осуществлено предельное временное разрешение порядка 10^{-14} сек. Между тем временное разрешение развертки, создаваемой оптико-механическими средствами, составляет в лучшем случае $10^{-8} - 10^{-9}$ сек.

Как было показано ранее [1, 2], указанный разрыв между предельным и практическим временным разрешением метода хронографии может быть устранен применением для развертки изображения электронно-оптического преобразователя. Принцип электронно-оптической хронографии ясен из рис. 1. Объектив O дает на фотокатоде Φ электронно-оптического преобразователя изображение A' источника света A . Вылетающие с фотокатода электроны ускоряются и фокусируются электронной линзой, условно показанной на рис. 1 в виде колец K_1, K_2 и диафрагмы D . Как показано на рис. 1, электроны выходят в свободное от поля пространство между диафрагмой D и люминесцентным экраном \mathcal{E} в виде узкого медленно сходящегося пучка. На пути этого пучка помещается отклоняющая система типа употребляемых в осциллографических трубках. В этой отклоняющей системе создается вращающееся ультравысокочастотное поле Π , которое осуществляет развертку электронного изображения по времени. Наиболее удобной является круговая развертка. Развернутое изображение весьма короткой искры показано на рис. 2. Если бы не было включено развертывающее поле, мы увидели бы истинное изображение искры, размер которого в данном опыте был $0,2 \times 25 = 5$ мм². Период развертки составлял $3 \cdot 10^{-9}$ сек. Рассматривая развертку искры по времени на рис. 2, сразу можно определить, например, что ее длительность составляла приблизительно $2 \cdot 10^{-10}$ сек., а время разгорания свечения до максимальной интенсивности — 10^{-11} сек.



Рис. 2.

Обозначим длину волны развертывающего напряжения через λ , радиус окружности развертки на люминесцентном экране через R , число линий изображения, разрешаемых на 1 см, через δ и скорость света через c . Тогда временное разрешение развертки, очевидно, составляет

$$\tau_{\text{разв.}} = \frac{\lambda}{2\pi R \delta c}. \quad (3)$$

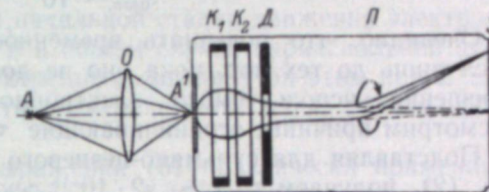


Рис. 1.

Наибольшее временное разрешение развертки, достигнутое до сих пор в наших опытах, было $3 \cdot 10^{-12}$ сек. при длине волны $\lambda = 1$ м. Однако формула (3) показывает, что, повышая частоту и радиус развертки, можно почти неограниченно повышать это временное разрешение. Например, при $\lambda = 1$ см, $R = 5$ см и $\delta = 100$ см $^{-1}$

$$\tau_{\text{разв.}} \sim 10^{-14} \text{ сек.}$$

Очевидно, что повышать временное разрешение развертки имеет смысл лишь до тех пор, пока оно не достигнет предельного временного разрешения используемого электронно-оптического преобразователя. Рассмотрим причины, ограничивающие $\tau_{\text{пред.}}$.

Подставляя для сурьмяно-цезиевого фотокатода $\Delta\nu \sim 5 \cdot 10^{14}$ в формулу (2), получаем $\tau_{\text{пред.}} \sim 2 \cdot 10^{-15}$ сек. Однако в действительности условие (2), которое имеет глубокий физический смысл и выражает общее квантовомеханическое соотношение неопределенностей для энергии, более жестко ограничивает временное разрешение. Поскольку минимальный интервал частот в световой вспышке длительностью τ составляет $\Delta\nu \sim \frac{1}{\tau}$, то это приводит к специфическому разбросу начальных скоростей фотоэлектронов, вырывааемых этой вспышкой из фотокатода:

$$(\Delta v_0)_z = \frac{h}{mv_0} \cdot \frac{1}{\tau}, \quad (4)$$

где h — постоянная Планка, m — масса электрона, v_0 — средняя начальная скорость фотоэлектронов. Разброс начальных скоростей, выражаемый формулой (4), проявляется заметным образом лишь при очень малых τ . Но кроме того, каждый фотокатод, как известно, характеризуется разбросом начальных скоростей фотоэлектронов, зависящим от работы выхода, расположения и ширины полос электронных уровней и других параметров этого фотокатода.

Поэтому в отличие от рассмотренного выше случая чисто оптической хронографии, где применение зеркальной оптики позволяет избавиться от

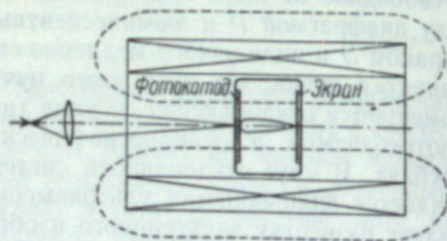


Рис. 3.

хроматической аберрации, в электронно-оптических преобразователях полностью избавиться от хроматической аберрации невозможно, и вносимые ею ограничения временного разрешения имеют принципиальный характер. Роль хроматической аберрации легче всего выявить на простом примере электронной линзы, показанной на рис. 3. Между фотокатодом и люминесцентным экраном приложено постоянное электрическое поле

и параллельное ему магнитное поле соленоида. Поскольку период вращения электрона в магнитном поле не зависит от скорости, время пролета электрона через рассматриваемую линзу определяется только осевой компонентой его начальной скорости v_{0x} . Рассмотрим два электрона, одновременно вылетающих из одной и той же точки фотокатода, причем один электрон имеет начальную скорость v_{0x} , а начальная скорость другого электрона равна нулю. Для того чтобы набрать скорость, равную v_{0x} , электрону с нулевой начальной скоростью требуется время

$$\tau = \frac{mv_{0x}}{eE}. \quad (5)$$

После достижения скорости v_{0x} время дальнейшего движения этого электрона до экрана с точностью до малых поправок не отличается от времени пролета до экрана того электрона, который имел скорость v_{0x} уже в момент вылета с фотокатода.

Можно показать, что формула (5), физически означающая, что разброс времени пролета электронов с различными значениями начальной скорости накапливается на самой начальной стадии движения электронов вблизи фотокатода, справедлива и в общем случае параксиальной фокусировки электронов в любых электронных линзах. При этом под E надо понимать значение напряженности электрического поля вблизи фотокатода.

Для получения на основе выражения (5) практически применимой формулы было измерено распределение фотоэлектронов по v_{0x} для сурьмяно-цезиевого фотокатода, освещаемого видимым светом в интервале нескольких сот ангстрем около $\lambda = 4500$ Å. Перерасчет этого распределения по формуле (5) показывает, что «бесконечно короткому» электронному импульсу с фотокатода соответствует импульс у экрана такой длительности, что половина всех электронов приходит на экран за время [2]

$$\Delta t_{1/2} \approx \frac{10^{-11}}{E} \text{ сек.}, \quad (6)$$

где E выражено в электростатических единицах. В настоящее время мы располагаем электронно-оптическими преобразователями, у которых E достигает величины 20 э.-ст. ед. Согласно формуле (6), $\Delta t_{1/2}$ при этом равно $5 \cdot 10^{-13}$ сек. При этом необходимо заметить, что $\Delta t_{1/2}$, даваемое выражением (6), вообще говоря, не является тем минимальным промежутком времени между двумя бесконечно короткими электронными импульсами с катода, который еще может быть разрешен. Фотометрирование изображения развертки импульса, характеризуемого величиной $\Delta t_{1/2}$, позволяет установить положение максимума почернения с ошибкой, по крайней мере на порядок меньшей, чем $\Delta t_{1/2}$. Благодаря этому при повышении напряженности поля у катода до 100 э.-ст. ед. (30 кв/см) можно было бы довести предельное временное разрешение до 10^{-14} сек. Для столь коротких промежутков времени надо еще учесть дополнительный разброс начальных скоростей, определяемый формулой (4). Комбинируя формулы (4) и (5), можно убедиться, что даже при $E = 100$ кв/см соотношение неопределенностей ограничивает временное разрешение величиной порядка 10^{-14} сек. Тот же порядок временного разрешения 10^{-14} сек. получается при оценке возможного разброса моментов вылета электронов из фотокатода за счет конечной толщины последнего.

Из сказанного видно, что физическое временное разрешение электронно-оптических преобразователей зависит в основном от напряженности поля у фотокатода и при максимальных возможных значениях этой напряженности составляет 10^{-14} сек.

Впервые мы применили электронно-оптическую хронографию для изучения коротких искровых разрядов.¹ Эти опыты показали [1], что в подходящих условиях могут быть получены искры длительностью несколько единиц 10^{-10} сек. с фронтом, т. е. временем разгорания свече-

¹ Первая попытка магнитной развертки изображения в электронно-оптическом преобразователе была сделана несколько ранее Куртни-Праттом с целью изучения взрывных процессов [3]. Однако Куртни-Пратт достиг временного разрешения лишь в 10^{-8} сек., и в его работе нет указаний на возможность получения тем же методом лучших разрешений, чем 10^{-9} сек.

ния порядка 10^{-11} сек. Тогда была предпринята разработка таких искровых счетчиков ядерных частиц, в которых искровой разряд имел бы подобные же параметры. В результате тремя из авторов настоящего доклада совместно с М. В. Бабыкиным, Ю. Ф. Скачковым и В. В. Шапкиным были разработаны плоско-параллельные счетчики с предельно малыми зазорами между электродами (около 0,1 мм). Эти счетчики достаточно подробно описаны в статьях [4, 5] и выставлены на Всесоюзной промышленной выставке. Отметим только, что одним из электродов этих счетчиков является полированная металлическая поверхность, а другим электродом служит полупрозрачный проводящий слой хлорного олова, нанесенный на



Рис. 4.

плоско-параллельную стеклянную пластинку. Временные характеристики этих счетчиков были изучены методом электронно-оптической хронографии, причем световая вспышка искры выводилась из счетчиков через полупрозрачный электрод и фокусировалась объективом на фотокатод электронно-оптического преобразователя.

В результате этих исследований, в частности в результате недавно законченной работы Ю. Ф. Скачкова, было показано, что при подходящем наполнении разработанные счетчики обладают разрешающим временем $1 \cdot 10^{-11}$ сек. На рис. 4 показана фотография совпадения по времени разрядов в двух близко расположенных искровых счетчиках, через которые проходит одна и та же β -частица. Изображения обеих искр сводились оптикой почти в одну и ту же точку фотокатода электронно-оптического преобразователя. Сравнивая развернутые изображения искр, можно сразу убедиться, что промежуток времени между началом искрового разряда в этих двух счетчиках не превышал $1 \cdot 10^{-11}$ сек.

Другим применением электронно-оптической хронографии явилось изучение [6] длительности импульсов электронов, выбиваемых из сурьмяно-цезиевого катода ионами цезия, ускоренными до энергии 15—20 кв. Было обнаружено, что эта длительность не превышает 10^{-11} сек.

Следует указать, что перечисленные опыты, в которых наблюдались световые вспышки и электронные импульсы весьма малой интенсивности,

стали возможны благодаря разработке достаточно чувствительных электронно-оптических преобразователей. Как показано в статьях [6, 7], где списаны эти преобразователи, их чувствительность настолько велика, что обеспечивает возможность фотографической регистрации каждого электрона, вылетающего с фотокатода.

В заключение доклада расскажем об одном новом варианте метода. До сих пор мы рассматривали развертку электронов в таких электронно-оптических преобразователях, которые снабжены стигматической электронной оптикой. В отсутствие развертки на люминесцирующем экране таких преобразователей воспроизводится изображение, спроектированное фотообъективом на их фотокатод. Это хорошее, четкое изображение, характеризующееся геометрическим разрешением до 300 лин./см.

Однако для ряда применений представляют интерес преобразователи с особой «гомоцентрирующей» оптикой. Принцип гомоцентрирующей электронно-оптической системы заключается в следующем. Все электроны, вылетающие со всего фотокатода, собираются на люминесцирующем экране в одну малую точку. При этом электроны, одновременно вылетевшие из различных точек фотокатода, приходят на экран также одновременно с точностью до погрешности, определяемой предельным временным разрешением преобразователя. Развертка превращает точку на экране в окружность. Электронно-оптическая хронография с гомоцентрирующей оптикой представляет интерес для изучения таких световых вспышек, которые испускаются «размазанными» источниками и не могли бы быть сфокусированы фотообъективом.

Описанный в нашем докладе электронно-оптический метод изучения быстротекающих процессов соединяет в себе принципы оптики и современной осциллографии и благодаря этому открывает широкие возможности для исследования промежутков времени в интервале $10^{-10} \div 10^{-14}$ сек., которые до сих пор не поддавались непосредственному наблюдению. Можно назвать следующие процессы, длительность которых относится к этому интервалу: возбужденные состояния ядра, эффект Черенкова, начальные стадии сцинтилляций, некоторые процессы в искровом разряде, вторичная электронная и ионно-электронная эмиссия, распад позитрония, спонтанный распад тяжелых мезонов и гиперонов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Е. К. Завойский и С. Д. Фанченко, ДАН СССР, 100, 661, 1955.
- [2] Е. К. Завойский и С. Д. Фанченко, ДАН СССР, 108, 218, 1956.
- [3] J. S. Courtney-Pratt, Research, 2, 287, 1949; Proc. Roy. Soc., 204A, 27, 1950.
- [4] Е. К. Завойский и Г. Е. Смолкин, Атомная энергия, 1, № 4, 46, 1956.
- [5] М. В. Бабыкин, А. Г. Плахов, Ю. В. Скачков, В. В. Шапкин, Атомная энергия, 1, № 4, 38, 1956.
- [6] Е. К. Завойский, М. М. Бутслов и Г. Е. Смолкин, ДАН СССР, 111, № 5, 996, 1956.
- [7] М. М. Бутслов, Е. К. Завойский, А. Г. Плахов, Г. Е. Смолкин, Атомная энергия, 1, № 4, 34, 1956.

В. А. СИМОНОВ и Г. П. КУТУКОВ

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПОКАДРОВОЙ ФОТОСЪЕМКИ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

(Реферат доклада)

При использовании для высокоскоростной покадровой фотосъемки электронно-оптических преобразователей с разверткой изображения и электронно-оптическим затвором требуются электрические схемы, создающие импульсы напряжений сложной формы и значительной амплитуды (несколько киловольт). Для генерирования импульсов развертки могут применяться схемы, использующие электронные лампы или тиратроны. Так, для генерации ступенчатых импульсов развертки разработана схема, имеющая 12 тиратронов, позволяющая получить с электронно-оптическим преобразователем снимки в 6 кадров с выдержками в 0,2; 0,5; 0,8 мсек. Схемы, использующие электронные лампы или тиратроны, оказываются громоздкими, сложными в наладке и недостаточно помехоустойчивыми; это затрудняет применение электронно-оптических преобразователей для покадровой фотосъемки.

Для высокоскоростной покадровой фотосъемки с электронно-оптическими преобразователями разработана схема, не содержащая электронных ламп или тиратронов. Формирование импульсов развертки и затвора осуществляется с помощью кабельных линий задержки при отражении сигналов от их концов. Схема позволяет получать снимки с $6 \div 10$ кадрами, при выдержке $0,05 \div 0,5$ мсек. Схема проста в наладке и помехоустойчива. Возможно питание схемы от выпрямителя электронно-оптического преобразователя без применения каких-либо других источников питания. Синхронизация с фотографируемым явлением осуществляется с помощью управляемого трехэлектродного разрядника или двухэлектродного разрядника, поджигаемого световой вспышкой.

Приводятся образцы высокоскоростных покадровых фотоснимков электрических разрядов, получаемых с электронно-оптическими преобразователями и кабельной схемой формирования импульсов развертки.

П. В. КЕВЛИШВИЛИ

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ В АППАРАТУРЕ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ФОТОГРАФИИ

(Реферат доклада)

При конструировании аппаратуры для высокоскоростного фотографирования наилучших результатов можно достигнуть при умелом сочетании оптико-механических систем с различными элементами электроники. При помощи схем, содержащих элементы электроники, наилучшим образом осуществляется синхронизация момента инициирования исследуемого процесса с заданным положением вращающегося зеркала скоростной фоторегистрирующей установки, измерение мгновенной или средней скорости фоторегистрации, отметка момента регистрации, управление скоростными затворами и т. д.

В последнее время благодаря разработке в СССР электронно-оптических преобразователей типа ПИМ-3, ПИМ-4 (автор разработки М. М. Бутслов) появилась возможность сконструировать фоторегистрирующие установки, не содержащие в своей конструкции каких-либо движущихся частей (вращающихся зеркал или движущейся фотопленки). Изготавливаемые в настоящее время электронно-оптические преобразователи позволяют осуществить фотографирование с выдержками менее одной десятиллионной доли секунды. Применение электронно-оптических преобразователей для высокоскоростной фоторегистрации также открывает новые возможности построения аппаратуры для исследования быстропротекающих процессов в широкой области спектра, а также аппаратуры с большой физической светосилой.

В докладе рассмотрены следующие электронные устройства:

1. Схемы синхронизации исследуемого явления с положением вращающегося зеркала фотокамеры, соответствующим началу регистрации; электромагнитные и фотоэлектрические датчики положения зеркала фотокамеры; схемы задержки инициирующего импульса; схемы синхронизации нескольких процессов; схемы синхронизации двух высокоскоростных фотокамер для стереосъемки.

2. Системы управления быстродействующими затворами фотокамер; типы быстродействующих затворов: поляризационные (ячейка Керра, ячейка Фарадея), электродинамические, взрывные, электромагнитные, электронно-оптические; характеристики быстродействующих затворов; фотореле и другие датчики, определяющие начало исследуемого процесса; схемы временной задержки в цепи закрытия затвора: электрические и акустические линии задержки, магнитные задерживающие устройства, электронные схемы временной задержки (накопительные и счетные схемы).

3. Системы измерителей средней скорости регистрации с таходинамом постоянного или переменного тока, счетно-импульсные стрелочные тахо-

метры, катодно-лучевые тахометры; применение шлейфовых осциллографов для измерения скорости; погрешности систем измерения средней скорости регистрации; системы измерения мгновенной скорости регистрации — в печатьвание на фотопленку меток времени; применение катодных осциллографов для измерения скорости.

4. Системы точного регулирования скорости регистрации.

5. Системы отметки момента регистрации — в печатьвание на фотопленку метки времени, определение момента регистрации при помощи вспомогательного осциллографа.

6. Элементы схем луп времени с электронно-оптическими преобразователями типа ПИМ; принципы построения схем луп времени; принципы построения схем фоторегистраторов со щелевой разверткой; требования к элементам электронной схемы; требования к оптическим узлам луп времени и фоторегистраторов с электронно-оптическими преобразователями.

Г. Л. ШНИРМАН

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ ЛУП ВРЕМЕНИ И ФОТОХРОНОГРАФОВ С ЗЕРКАЛЬНОЙ РАЗВЕРТКОЙ

В развитии современных физических и физико-химических исследований немаловажную роль играет высокоскоростное фотографирование и фотохронографирование. Исключительная быстротечность многих явлений, представляющих в настоящее время значительный практический и научный интерес, заставляет исследователей проявлять большую настойчивость и изобретательность для углубления в мир малых промежутков времени, где органы чувств человека неспособны к исследовательному восприятию.

Для экспериментального исследования многих вопросов, связанных с быстрым горением, распространением ударных волн в различных средах, детонацией взрывчатых веществ, развитием электрических разрядов и т. п., требуется такая регистрирующая аппаратура, которая способна следить за развитием процессов на протяжении миллионных и десяти-миллионных долей секунды. Среди таких приборов существенную пользу оказывают высокоскоростные лупы времени и фотохронографы с зеркальной разверткой. Несмотря на быстрое и исключительно перспективное развитие фотографических систем с электронно-оптическими преобразователями, неуклонно продвигающихся в области рекордно высоких скоростей регистрации, лупы времени и фотохронографы с зеркальной разверткой еще долго не потеряют своего значения и будут успешно применяться в исследовательской практике.

Лупы времени и фотохронографы с зеркальной разверткой обеспечивают наиболее высокие скорости фотографирования и регистрации среди всех приборов, обладающих оптико-механической разверткой. Использование вращающегося зеркала позволяет получить на конце «оптического рычага» чрезвычайно большие линейные скорости перемещения изображения, тем больше, чем длиннее «оптический рычаг».

Многие исследователи, стремясь повысить скорость регистрации, шли по пути увеличения оптического рычага, считая, что только недостаток света может лимитировать его величину. Сколько-нибудь квалифицированный расчет подобных оптических приборов обычно не производился, а теория зеркальной развертки была в самом зачаточном состоянии. Как правило, фотохронографические установки и высокоскоростные лупы времени создавались самими исследователями для решения конкретных экспериментальных задач и для авторов этих исследований представляли второстепенный интерес. Очевидно, что для создания высокоэффективных исследовательских приборов подобного типа прежде всего было необходимо разобраться в самых элементарных вопросах, связанных с выбором основных параметров оптических систем луп времени и фотохронографов с зеркальной разверткой.

При исследовании процессов быстрого горения и детонации взрывчатых веществ часто пользуются щелевыми фотохронографами, позволяющими регистрировать во времени развитие явления в каком-либо выбранном направлении. Фотохронографы с зеркальной разверткой, обеспечивающие наиболее высокие скорости регистрации, обычно осуществляются по схеме, представленной на рис. 1.

Входной объектив O строит изображение исследуемого явления в плоскости узкой щели $Щ$. Вырезанная щелью полоска изображения с помощью коллектива K , промежуточного объектива $П$ и вращающегося зеркала $З$ изображается на поверхности фотоматериала Φ , перемещаясь по нему при повороте зеркала. Так как длина щели перпендикулярна направлению развертки, то на полученных снимках по одной из координат

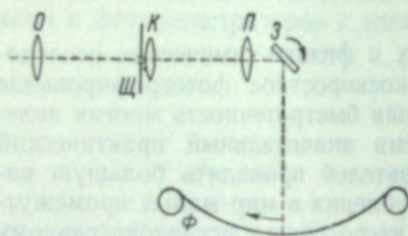


Рис. 1.

осей будет измеряться время, по другой — развитие самого явления.

Очевидно, что чем тоньше будет полоска, изображающая на снимке явление, тем чаще можно будет на снимке производить промеры изменяющегося явления. Однако существует предел уменьшения толщины полоски изображения, связанный с развитием дифракционных явлений, даже в случае идеального объектива, лишенного aberrаций.

Если система «промежуточный объектив—коллектив—зеркало» обеспечивает на применяемом фотоматериале разрешение в N линий на миллиметр, то нет смысла делать больше чем N промеров явления на длине 1 мм записи при наименьшей практически целесообразной толщине изображения полоски явления, которую, очевидно, тоже нет смысла из-за значительной потери освещенности делать тоньше $\frac{1}{N}$ мм.

Наименьшее расстояние между двумя соседними промерами явления, выраженное в единицах времени, будем называть разрешающей способностью фотохронограммы по времени. Таким образом, разрешающая способность фотохронограммы по времени может быть выражена формулой:

$$\tau = \frac{1}{Nv}, \quad (1)$$

где N — число линий, разрешаемых на 1 мм длины и v — скорость развертки в мм/сек.

В оптической схеме фотохронографа пучки света, как правило, ограничиваются зеркалом. По интересующему нас направлению пучки ограничивает проекция поперечного размера зеркала на плоскость поперечного сечения пучка. В этом случае дифракционная разрешающая способность оптического тракта может быть приближенно выражена формулой:

$$N \approx 1500 \frac{l \sin \alpha}{F}, \quad (2)$$

где l — поперечный размер зеркала, α — угол между плоскостью зеркала и оптической осью и F — расстояние между зеркалом и фотоматериалом.

Так как линейная скорость развертки равна

$$v = 4\pi Fn, \quad (3)$$

где n число оборотов зеркала в секунду (в формуле предусмотрено удвое-

ние угла отражения при повороте зеркала), то, учитывая (2) и (3), формулу (1) можно приближенно переписать в следующем виде:

$$\tau \approx \frac{1}{18000 nl \sin \alpha}. \quad (4)$$

Характерно, что в выражении для разрешающей способности по времени величина оптического рычага F не участвует и τ зависит только от скорости вращения зеркала и величины проекции зеркала на плоскость поперечного сечения пучка света. Это значит, что увеличение оптического рычага не повышает разрешения по времени, так как выигрыш от увеличения линейной скорости развертки компенсируется соответственным падением дифракционного разрешения.

Уменьшение оптического рычага по тем же соображениям не должно приводить к падению разрешения по времени, но практически, в реальных оптических системах постепенно, по мере роста дифракционного разрешения начнут становиться заметными aberrации элементов оптической системы и, наконец, скажется разрешающая способность самого фотоматериала. Дальнейшее уменьшение оптического рычага будет приводить к пропорциональному падению разрешения по времени. С другой стороны, уменьшение оптического рычага приводит к увеличению светосилы системы, что в особенности важно при регистрации явлений в условиях недостатка света.

Оптимальным в общем случае представляется выбор оптического рычага такой длины (при заданном размере зеркала), чтобы дифракционное разрешение с учетом aberrаций было бы соизмеримо с разрешающей способностью фотоматериала. Общее разрешение при этом окажется несколько сниженным по сравнению с длинным оптическим рычагом, но габариты прибора окажутся соответственно уменьшенными, а светосила — увеличенной.

Оптимальная компоновка оптической схемы прибора обеспечивает получение записей с хорошим использованием разрешающей способности фотоматериала. Измерения подобных записей производятся с помощью той или иной увеличительной оптической аппаратуры, в простейшем случае — фотоувеличителя.

Достижение наибольшего разрешения по времени, как это следует из формулы (4), связано с увеличением поперечного размера зеркала или числа его оборотов в секунду. Однако увеличение числа оборотов зеркала требует соответствующего уменьшения его размеров. Предельно допустимое (по соображениям прочности) число оборотов зеркала может быть выражено формулой:

$$n_m = \frac{Q}{b} \sqrt{\frac{P}{d}}, \quad (5)$$

где P — предел упругости материала зеркала, d — плотность этого материала, Q — коэффициент, зависящий от формы зеркала. Подставляя (5) в (4) и сокращая, получаем выражение для предельно возможного разрешения по времени:

$$\tau_m \approx \frac{1}{18000 Q \sin \alpha} \sqrt{\frac{d}{P}}. \quad (6)$$

Таким образом, предельно возможное разрешение по времени при выбранном материале и форме зеркала от его размеров не зависит. Изменение размеров зеркала приводит только к изменению предельно допустимых оборотов (5), но на предельно возможном разрешении по времени не сказывается. Это чрезвычайно существенное обстоятельство позволяет выбирать необходимые размеры зеркала в соответствии

с возможностями имеющихся двигателей, не гонясь за рекордно высокими и трудно достижимыми угловыми скоростями вращения зеркал.

Зеркальная развертка дает исключительно эффективные результаты в лупах времени. Наибольшие скорости последовательного фотографирования (без рассеивания изображения) достигаются в лупах времени с оптической коммутацией, осуществляемой вращающимся зеркалом. Общеизвестная схема подобного инструмента представлена на рис. 2. Входной объектив O строит через коллектив K промежуточное изображение исследуемого явления в районе грани вращающегося зеркала $З$. Отраженный

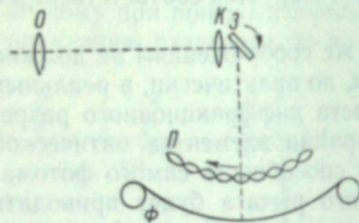


Рис. 2.

вращающимся зеркалом пучок света поочередно проходит через каждый из промежуточных объективов Π и фокусируется на соответствующих участках фотоматериала Φ . Таким образом, промежуточные линзы поочередно переносят промежуточное изображение из района грани зеркала на фотоматериал. Коллективная линза K строит изображение входного объектива O на входных отверстиях промежуточных объективов Π , осуществляя вместе с вращающимся зеркалом $З$ световую коммутацию и световой затвор для каждого из миниатюрных фотоаппаратов, образованных промежуточными объективами и фотоматериалом. Несмотря на вращение зеркала, каждое изображение на фотоматериале за весьма небольшое время своего существования остается практически неподвижным, если плоскость промежуточного изображения и точка пересечения оптической осью прибора зеркальной грани совпадают.

Снимки, получаемые лупами времени, могут содержать то или иное количество подробностей. Мерой количества подробностей, различаемых на снимках, может служить по аналогии с телевидением число полос, еще различаемых на снимках. Таким образом, общее количество полос, еще разрешаемых на снимке по соответствующему направлению, — «оптический стандарт» — равно произведению величины фотографического разрешения на размер кадра по соответствующему направлению:

$$M = Nh. \quad (7)$$

В зеркальных лупах времени с оптической коммутацией фотографическое разрешение в основном определяется промежуточными объективами, переносящими изображение с зеркала на фотоматериал. Так как относительные отверстия подобных объективов в лупах времени обычно достаточно малы, то разрешение определяется главным образом дифракционными явлениями и можно написать, что

$$N \approx 1500 \frac{a}{f}, \quad (8)$$

где N — число линий, разрешаемых на длине в 1 мм, a — отверстие промежуточного объектива (линзы), f — расстояние от промежуточных объективов (линз) до фотоматериала.

Для установления зависимостей между величинами отверстий линз a , размером кадров в направлении развертки h , поперечным размером вращающегося зеркала b и его угловым положением α , числом оборотов (расстоянием между зеркалом и фотоматериалом) F , расстоянием f и оптическим стандартом M , рассмотрим чертеж, представленный на рис. 3. Считая, что изображение фото-

графируемого явления заполняет все зеркало, можно написать, что размер изображения на фотоматериале будет равен

$$h = \frac{bf}{F-f} \sin \alpha. \quad (9)$$

Так как с точки зрения частоты фотографирования кадры выгодно располагать вплотную, а линзы для повышения разрешения должны иметь

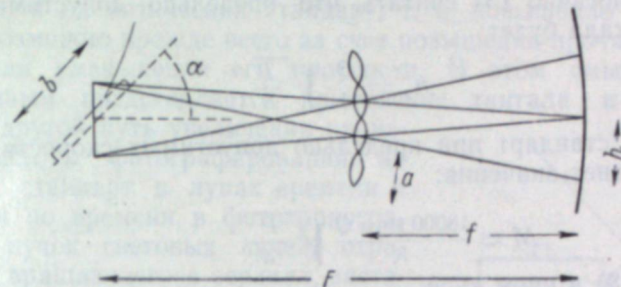


Рис. 3.

наибольшее отверстие (т. е. также располагаться вплотную), то размеры кадра и линзы связываются следующим соотношением:

$$\frac{h}{F} = \frac{a}{F-f}. \quad (10)$$

Подставляем (8) и (9) в (7):

$$M = \frac{1500 ab \sin \alpha}{F-f}. \quad (11)$$

Так как кадры размером h расположены вплотную, то частота фотографирования может быть определена как отношение полного пути конца луча развертки за единицу времени к размеру кадра:

$$K = \frac{4\pi Fn}{h}, \quad (12)$$

(удвоение коэффициента при π связано с тем, что угловая скорость луча, отраженного от вращающегося зеркала, вдвое больше угловой скорости зеркала).

Подставляем (10) в (12), преобразуем и результат подставляем в (11):

$$M \approx 18000 \frac{bn \sin \alpha}{K}. \quad (13)$$

Таким образом, оптический стандарт оказался зависящим только от размера и углового положения зеркала и отношения числа его оборотов в секунду к частоте фотографирования.

Очевидно, что величина оптического рычага F и расстояние между линзами и фотоматериалом f должны определяться принимаемым фотографическим разрешением, так как при изменении F и f оптический стандарт не меняется, а варьирует только величина разрешения N .

Из (9) и (10) можно получить [исключая $h(F-f)$]

$$\frac{a}{f} = \frac{b \sin \alpha}{F}. \quad (14)$$

Подставляем (14) в (8) и преобразуя, получаем:

$$F = 1500 \frac{b \sin \alpha}{N}. \quad (15)$$

Таким образом, оптический рычаг определяется величиной зеркала, его угловым положением и принимаемым фотографическим разрешением.

Для определения отрезка f подставляем значение h из (12) в (9), решаем относительно f и получаем

$$f = \frac{F}{1 + \frac{Kb \sin \alpha}{4\pi Fn}} \quad (16)$$

Если аналогично (5) считать, что предельно допустимая скорость вращения зеркала будет

$$n_m = \frac{Q}{b} \sqrt{\frac{P}{d}}, \quad (17)$$

то оптический стандарт при предельно допустимых скоростях вращения зеркала достигнет значения:

$$M \approx \frac{18000 \sin \alpha Q}{K} \sqrt{\frac{P}{d}} \quad (18)$$

Перепишем (18) в ином виде:

$$H = 18000 \sin \alpha \cdot Q \sqrt{\frac{P}{d}}, \quad (19)$$

где

$$H = MK \quad (20)$$

есть полное число полос (в направлении развертки), фотографируемых в единицу времени. Уменьшая оптический стандарт, можно соответственно увеличивать частоту фотографирования. Доведя оптический стандарт до $M=1$, мы перестанем различать подробности в направлении развертки и фактически перейдем к системе фотохронографа. Формулы (4) и (19) в этом случае совпадут, так как H оказывается равным частоте фотографирования, а разрешение во времени τ обратно частоте фотографирования.

В соответствии с формулой (19), так же как и в случае фотохронографа, наибольшее число полос, фотографируемых в единицу времени, от размеров зеркала не зависит, так как изменение размеров зеркала приводит только к соответствующему изменению предельно допустимых оборотов. Для выбранного материала и конфигурации зеркала при работе на предельно допустимых режимах существует однозначное соотношение между величиной оптического стандарта и частотой фотографирования (20). При этом выбор того или иного соотношения между размером зеркала и скоростью его вращения (17) может быть подчинен чисто конструктивным соображениям.

В современной зарубежной практике сверхвысокоскоростного фотографирования за последнее время все чаще применяются для вращения зеркал высокооборотные воздушные турбинки. Некоторые из этих турбинок приводятся в действие сжатым гелием.¹ Исключительно высокие скорости вращения таких турбинок (достигающие, по литературным данным, 23 000 оборотов в секунду) позволяют использовать в режимах, близких к пределу упругости материала зеркал, только относительно небольшие зеркала. Применяя несравненно более простые и удобные в обращении электромоторные приводы для вращения зеркал с помощью

¹ Скорость звука в гелии примерно в 5 раз больше скорости звука в воздухе. Соответственно с этим и скорость гелиевой струи, выходящей из сопла турбинки на рабочее колесо, примерно в 5 раз больше скорости воздушной струи, при всех прочих равных условиях.

механических редукторов, можно создавать лупы времени со значительно большими зеркалами, но соответственно меньшими скоростями вращения этих зеркал, дающие такие же результаты по оптическому стандарту и частоте фотографирования или разрешению по времени, как и лупы времени или фотохронографы с высокооборотными гелиевыми турбинками. Очевидно, что дальнейшее увеличение произведения частоты фотографирования на оптический стандарт, т. е. повышение разрешения по времени, возможно прежде всего за счет повышения прочности материала зеркала или уменьшения его плотности. В этом смысле достаточно перспективным представляется применение тантала и его сплавов.

Есть и другой путь увеличения произведения частоты фотографирования на оптический стандарт в лупах времени и разрешения по времени в фотохронографах. Если пучок световых лучей, отраженный от вращающегося зеркала, заставить повторно отражаться от вращающихся зеркал, то после каждого отражения можно получить пропорциональное увеличение скорости отклонения пучка лучей. Таким образом, можно значительно повысить число полос, фотографируемых в единицу времени лупами времени, или значительно поднять разрешение по времени у фотохронографов, не меняя размеров и скорости вращения зеркал в этих приборах.

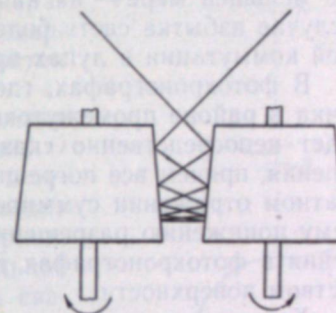


Рис. 4.

Среди множества возможных схемных решений метода многократных отражений для практического осуществления на этом принципе луп времени с оптической коммутацией или зеркальных фотохронографов весьма эффективной представляется предложенная автором система с клиновым зазором, образованным двумя наклоненными плоскими зеркалами, вращающимися в противоположных направлениях (рис. 4).

Пучок света, наклонно введенный в зазор между зеркалами, в результате последовательных отражений постепенно углубляется в клиновом зазоре. Наклон пучка уменьшается после каждого отражения от зеркал, пока пучок не перейдет через горизонтальное положение. Затем его наклон начинает после каждого отражения увеличиваться, а сам пучок перемещается из глубины зазора к верхнему краю зеркал, после чего наклонно выходит из клинового зазора.

При вращении зеркал в противоположных направлениях пучок света при каждом отражении от любого из зеркал поворачивается с угловой скоростью, вдвое большей угловой скорости вращения каждого зеркала. В результате последовательных отражений угловая скорость поворота пучка увеличивается соответственно числу отражений. Таким образом, после m отражений угловая скорость пучка будет в $2m$ раз больше угловой скорости вращения зеркал и в m раз больше угловой скорости пучка, отраженного от вращающегося зеркала один раз.

В отличие от многих возможных вариантов многократного отражения в системе с клиновым зазором между зеркалами, вращающимися в противоположных направлениях, каждое отражение является активным, т. е. увеличивает угловую скорость пучка света на выходе. Предельно допустимое количество отражений зависит от ряда причин и в первую очередь от качества зеркал. Если применять металлические зеркала с алюминиевым покрытием, то при каждом отражении будет поглощаться

в среднем 14% света. Общее пропускание света через зеркальную систему в этом случае будет составлять (в %):

Число отражений	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Пропускание света	74	64	55	47	40	35	30	26	22	19	16	14	12	10,5

В лупах времени, где коммутирующая зеркальная система располагается по ходу пучка в районе промежуточного изображения, качество поверхности зеркал будет в большой мере сказываться на изображении входной диафрагмы на отверстиях промежуточных объективов (линз), и в меньшей мере — на качестве изображений кадров. Это позволяет в случае избытка света более чем на порядок повысить скорость оптической коммутации в лупах времени.

В фотохронографах, где зеркальная система располагается по ходу пучка в районе промежуточного объектива, качество поверхности зеркал будет непосредственно сказываться на изображении фотографируемого явления, причем все погрешности, вносимые зеркалами, будут при многократном отражении суммироваться, что может привести к соответствующему понижению разрешения. Поэтому применение многократного отражения в фотохронографах требует зеркал с исключительно высоким качеством поверхности.

Хотя пучки света проходят между зеркалами в клиновом зазоре сравнительно небольшой путь, рабочий угол отклонения пучка света на выходе из зеркальной системы невелик. Чем больше число отражений пучка света между зеркалами, тем меньше рабочий угол отклонения пучка и тем короче полное время фотографирования. В силу этого обстоятельства зеркальные системы с многократным отражением могут быть эффективно использованы в лупах времени и фотохронографах только при том условии, что начало исследуемого явления жестко синхронизируется с начальным положением зеркальной системы, при котором пучок света выходит на регистрацию. Для построения «ждущих» луп времени и фотохронографов, способных регистрировать случайно возникающие явления, рассматриваемая система многократного отражения непригодна.

В Институте химической физики Академии наук СССР была построена лупа времени с десятикратным отражением, разработанная автором совместно с канд. техн. наук А. С. Дубовиком и П. Б. Кевлишвили. Применение зеркальной системы с клиновым зазором позволило довести частоту фотографирования до 6 млн кадров в секунду при диаметре кадра в 12 мм и до 33 млн кадров в секунду при диаметре кадра в 5 мм. Система электронной автоматики обеспечивает с необходимой точностью синхронизацию исследуемого процесса с рабочим положением зеркальной системы и управляет работой основных и вспомогательных устройств лупы времени. В этом приборе за счет увеличения полного времени фотографирования (т. е. полного числа кадров) были только частично использованы возможности системы многократного отражения. При введении еще более жесткой системы синхронизации исследуемого процесса с рабочим положением зеркал и при уменьшении полного числа фотографирования могут быть подняты еще в несколько раз.

При исследовании ярких, самосветящихся, быстро протекающих явлений часто оказывается достаточным получение отдельных снимков через сравнительно длинные промежутки времени. Применение обычных средств скоростного фотографирования в этих случаях не дает удовлетворительных результатов, так как относительно продолжительная выдержка, со-

измеримая с временем смены кадров, приводит к смазыванию изображений быстро развивающихся явлений. Применение высокоскоростных луп времени в этих случаях также нецелесообразно, так как они дают большое количество ненужных промежуточных снимков, полное же время регистрации при этом оказывается сильно ограниченным.

При решении подобных задач хорошие результаты может дать схема «зеркальной отсечки» (рис. 5). Объектив O строит промежуточное изображение исследуемого явления в районе грани вращающегося зеркального четырехгранника Z . Это изображение, последовательно отражаемое каждой зеркальной гранью, переносится промежуточным объективом $П$ на фотоматериал Φ , расположенный на поверхности вращающегося барабана. Коллектив K изображает выходное отверстие объектива O в плоскости входного отверстия промежуточного объектива $П$.

При вращении зеркального четырехгранника Z изображение выходного отверстия объектива O перемещается относительно объектива $П$, и в течение некоторого времени лучи света проходят через объектив $П$ и попадают на фотоматериал. При достаточном расстоянии между зеркальной гранью и объективом $П$ продолжительность световой вспышки на фотоматериале оказывается весьма малой по сравнению с периодом повторения вспышек.

В практически осуществленных приборах при частоте фотографирования порядка 2 500 кадров в секунду эффективное время выдержки достигает $1/100\,000$ доли секунды. При такой короткой выдержке относительно периода смены кадров задача оптической компенсации решается сравнительно просто. Промежуточное изображение располагается не на самой грани зеркального четырехгранника, а несколько ближе к входному объективу O . Тогда при повороте зеркальной грани изображение на фотоматериале не будет оставаться неподвижным, как это имеет место в лупах времени с оптической коммутацией, а начнет перемещаться вбок. Установив необходимое направление вращения барабана с фотоматериалом и регулируя положение промежуточного изображения, можно добиться весьма точного сопровождения фотоматериала движущимся изображением исследуемого явления.

Лупы времени подобного типа обеспечивают высокое качество изображения при коротких выдержках и сравнительно небольшой частоте фотографирования.

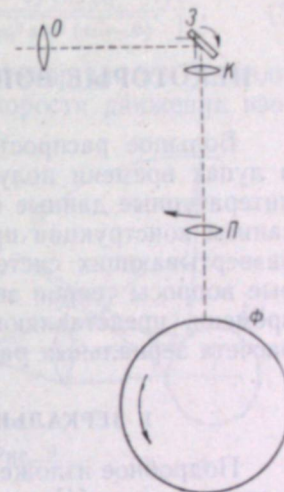


Рис. 5.

А. С. ДУБОВИК

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ЗЕРКАЛЬНОЙ РАЗВЕРТКИ

Большое распространение в высокоскоростных фоторегистраторах и лупах времени получила зеркальная развертка изображения. Однако литературные данные по этому вопросу в основном ограничиваются описанием конструкции приборов, не касаясь методики расчета зеркальных развертывающих систем. В настоящей статье рассматриваются некоторые вопросы теории зеркальной развертки в фоторегистраторах и лупах времени, представляющие практический интерес, и приводятся методы расчета зеркальных развертывающих систем.

1. ЗЕРКАЛЬНАЯ РАЗВЕРТКА В ФОТОРЕГИСТРАТОРАХ

Подробное изложение этой части теории зеркальной развертки дается в статье автора [1], поэтому остановимся только на некоторых новых вопросах. Известно [1], что геометрическим местом изображения точки на оси в общем случае зеркальной развертки, когда отражающая грань зеркала не совпадает с осью вращения, а отстоит от нее на некотором расстоянии, является улитка Паскаля. Скорость движения изображения при этом не является равномерной и определяется производной дуги (улитки Паскаля) по углу поворота зеркала [1]. После подстановки значений производной для улитки Паскаля и перехода от угла поворота φ к угловой скорости движения зеркала Ω получим:

$$v = 2l\Omega \sqrt{1 + 2m \cos(\varphi + \alpha) + m^2}, \quad (1)$$

где $m = \frac{R}{l}$ — коэффициент деформации окружности при зеркальной развертке,

R — расстояние от оси вращения до отражающей плоскости зеркала,

l — радиус развертки,

$\varphi + \alpha = \psi$, где α — постоянный малый угол, зависящий от положения оптической оси прибора,

φ — угол поворота зеркала.

Если по малости величин принять $m^2 = 0$ и $\alpha = 0$, то получим приближенную формулу скорости движения по улитке Паскаля:

$$v = 2l\Omega (1 + m \cos \varphi), \quad (2)$$

которая по сравнению с формулой (1) дает погрешность порядка 0,2%. Уравнения (1) и (2) приводят значение скорости развертки по улитке Паскаля. При замене улитки Паскаля окружностью, что обычно имеет место при построении фоторегистраторов, фактические скорости движения изображения по выбранной фокальной поверхности могут отличаться от

скорости движения изображения по улитке на величины, которые в некоторых случаях должны быть учитываемы.

А. И. Чурбаков нашел значение скорости движения изображения для указанного случая (рис. 1). На рис. 1 O_1 — центр вращения зеркала, O_2 — центр заменяющей окружности, θ — угол, определяющий положение полярной оси заменяющей окружности. Кроме того, угол $\omega = \varphi + \alpha$. Скорость движения изображения по заменяющей окружности определяется уравнением

$$v_{ок.} = \Omega \sqrt{\rho_{ок.}^2 + \left[\rho_0 \sin(\omega - \theta) + \frac{\rho_0^2 \sin(\omega - \theta) \cos(\omega - \theta)}{\sqrt{R^2 - \rho_0^2 \sin^2(\omega - \theta)}} \right]^2}, \quad (3)$$

где $\rho_{ок.}$ — радиус-вектор окружности, ρ_0 — радиус-вектор улитки Паскаля. Уравнение (3) повышает точность определения скорости движения изо-

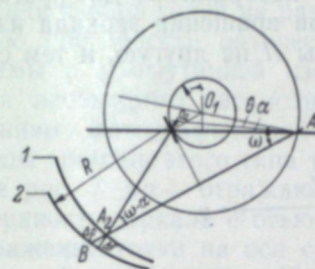


Рис. 1.
1 — улитка Паскаля, 2 — заменяющая окружность.

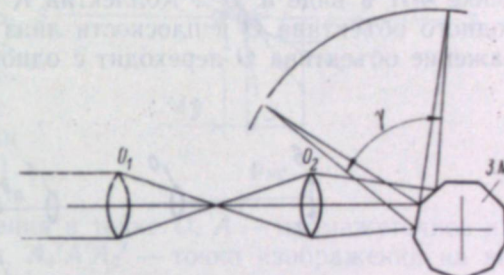


Рис. 2.

бражения по сравнению с уравнением (1) на 0,5—0,6%. Элементы теории зеркальной развертки для фоторегистраторов были впервые применены в 1949 г. при проектировании прибора СФР [2], который в настоящее время прочно вошел в практику физического эксперимента и выпускается оптико-механической промышленностью. В последнее время фоторегистратор СФР подвергся модификации, в результате которой получен новый прибор ЖФР-1.

Как известно, прибор СФР является фоторегистратором с синхронизацией положения зеркала с началом изучаемого явления. Однако такой метод скоростной съемки не всегда удобен, особенно когда приходится производить регистрацию явления многими приборами одновременно или изучать явления с неопределенным по времени или затягивающимся началом. В таких случаях существенное значение имеют приборы с непрерывной разверткой. На рис. 2 показан принцип работы такой системы. При смене зеркальных граней многогранника изображение объекта съемки перемещается в пределах рабочего угла прибора. Поскольку рабочий угол прибора взят с некоторым запасом, существует преемственность между началом и концом записи на фокальной дуге, что позволяет отказаться от синхронизации начала явления и положения зеркала.

В приборе ЖФР-1 использованы в основном все узлы и электрическая система прибора СФР. Существенному изменению только подверглось зеркало, которое заменено зеркальным двенадцатигранником. Электрическая система синхронизации в пульте управления прибора используется для определения скорости вращения зеркального многогранника и для инициирования изучаемого явления. Скорость развертки в приборе ЖФР-1 составляет (при частоте вращения зеркала 90 000 мин.⁻¹) 4,5 км/сек., что при ширине щели прибора, равной 0,03 мм, обеспечивает

разрешение по времени $2 \cdot 10^{-8}$ сек. Поскольку грань двенадцатигранника довольно далеко отстоит от оси вращения и происходит некоторое (в пределах 2,5%) изменение скорости при движении изображения по пленке в рабочем угле, прибор снабжается таблицей точных значений скоростей, рассчитанных по формуле (3), для различных участков фокальной дуги.

II. ЗЕРКАЛЬНАЯ РАЗВЕРТКА В ЛУПАХ ВРЕМЕНИ

1. Зеркальные лупы времени с линзовыми блоками

а. Общий принцип устройства лупы времени с зеркальной разверткой и коммутацией изображения

На рис. 3 лучи от объекта ab при помощи объектива O и коллектива K строятся в плоскости $a'b'$ в районе вращающегося зеркала. Повернутое в зеркале изображение $a''b''$ при помощи малых линз L строится на пленке $\Phi\Pi$ в виде $a'''b'''$. Коллектив K строит изображение диафрагмы входного объектива O в плоскости линз L . При вращении зеркала изображение объектива O переходит с одной линзы L на другую, и тем са-

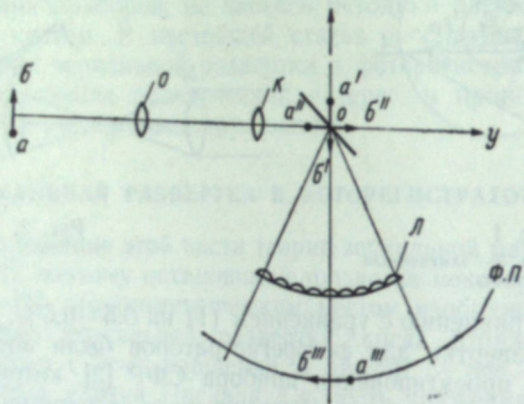


Рис. 3.

мым осуществляется быстродействующий оптический затвор типа дискового затвора и происходит впечатывание отдельных кадров на пленку. Малые линзы L расположены в отдельном блоке таким образом, что дают последовательные фотографии явлений.

б. Положение точек отражения и центра развертки

На рис. 3 представлен идеальный случай лупы времени с зеркальной разверткой и линзовым блоком, когда отражающая поверхность зеркала и его ось вращения совпадают. При этом изображение, помещенное в точку O , при вращении зеркала неподвижно относительно оптической оси. Практически, как это было указано ранее, приходится брать зеркало конечной толщины и с плоскостями, расположенными симметрично относительно оси вращения (рис. 4).

На рис. 4 показано положение отражающей грани зеркала при различных углах его поворота. При этом точка отражения перемещается вдоль оптической оси по закону

$$y = \frac{R - h \sin \varphi}{\cos \varphi}. \quad (4)$$

Возникает вопрос: где в таком случае помещать промежуточное изображение? Пусть оно помещается посередине между крайними значениями y . В этом случае будут моменты, когда промежуточное изображение не совпадает с точкой отражения. Такой случай представлен на рис. 4. Гео-

метрическим местом изображения предмета [в нашем случае промежуточного изображения $a'b'$ (рис. 3), находящегося вблизи зеркала] в этом зеркале, как это видно из рис. 5, является внутренняя ветвь улитки Паскаля [1], которая определяется уравнением в полярной форме:

$$\rho = 2l \cos \omega - 2R. \quad (5)$$

Здесь (рис. 5) AO — полярная ось; точка A — начало координат. Полная внутренняя ветвь улитки Паскаля представлена на рис. 6. Таким образом, если промежуточное изображение A находится на некотором расстоянии от центра развертки, его изображение в зеркале при вращении последнего движется по внутренней ветви улитки Паскаля.

Для определения влияния смещения изображения на разрешающую способность оптической системы с коммутацией изображения необходимо рассмотреть механизм фотографической съемки лупы времени этого типа (рис. 7). На рис. 7 pp — отражающая поверхность зеркала с осью вращения в точке O , A — промежуточное изображение точки на оси системы, $A_1'A_2'$ — точки изображения на внутренней ветви улитки Паскаля, соответствующие перемещению луча на угол ξ при экспонировании одного кадра. Из рис. 7 видно, что при этом

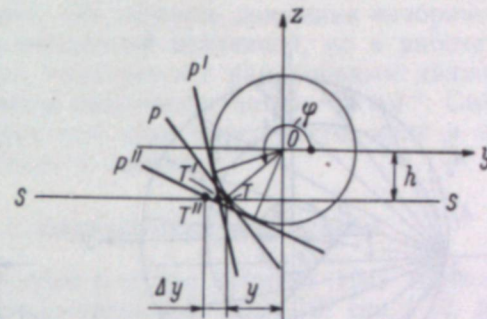


Рис. 4.

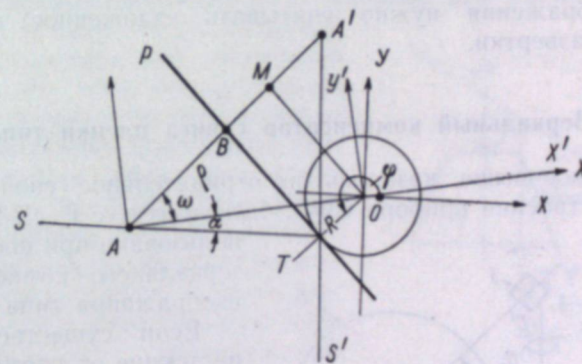


Рис. 5.

происходит смещение изображения на пленке из положения A_1'' в положение A_2'' — эта величина и будет смазом изображения, который найдется из простых геометрических соображений и определяется следующей формулой:

$$\Delta y'' = (Z_2'' + Z_1'') \sin \frac{\xi}{2} \cdot \frac{r_2}{r_1}, \quad (6)$$

где Z_2'' и Z_1'' — координаты точек A_1' и A_2' в системе $y''TZ''$. Дефокусировка изображения $\Delta Z''$ при этом будет:

$$\Delta Z'' = (Z_2'' - Z_1'') \cos \frac{\xi}{2} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2. \quad (7)$$

Угол ξ определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{2a}{r_1}, \quad (8)$$

где a — диаметр или ширина малой линзы, r_1 — радиус линзового блока.

Формулы (6) и (8) были использованы для оценки влияния рассмотренного явления в приборе СФР [2]. При неправильной установке промежуточного изображения и смещения его относительно некоторого оптимального положения на $0,1 \div 0,2$ мм разрешение падает с 25 до $12 \div 16$ мм⁻¹ за счет сдвига изображения. Таким образом, при по-

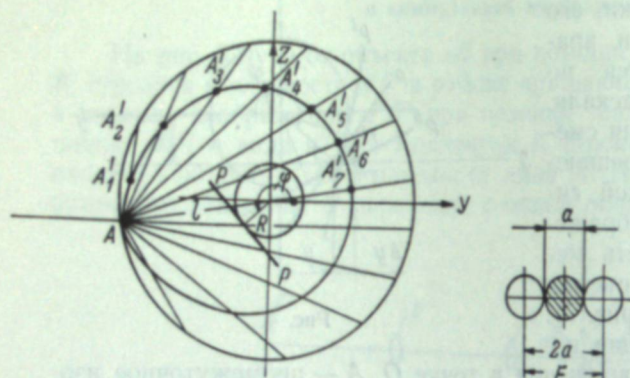


Рис. 6.

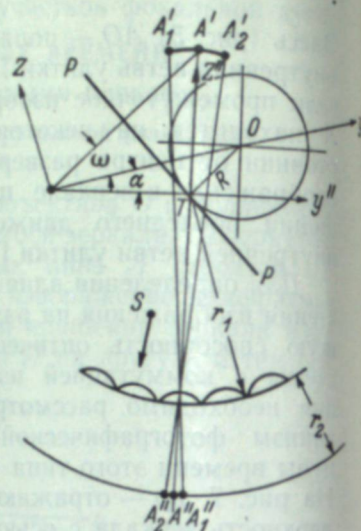


Рис. 7.

строении подобных приборов и расчете допусков на установку промежуточного изображения нужно учитывать изложенное выше свойство зеркальной развертки.

2. Зеркальный компенсатор сдвига пленки типа СК

Изложенное выше, казалось бы отрицательное свойство, открытое нами при построении прибора СФР, было вместе с Г. Л. Шнирманом использовано при построении нового зеркального компенсатора сдвига изображения типа СК.

Если существенно увеличить расстояние от промежуточного изображения до центра развертки, то можно добиться довольно больших перемещений промежуточного изображения.

На рис. 8 лучи от объекта, который находится в практической бесконечности, попадают через диафрагму D в объектив O_1 , который строит промежуточное изображение в районе зеркального четырехгранника 3. В дальнейшем системой объективов O_2 и O_3 и зеркала 3 изображение передается на пленку, которая располагается на вращающемся барабане. Расстояние от промежуточного изображения до отражающей грани четырехгранника выбирается таким, чтобы перемещение изображения

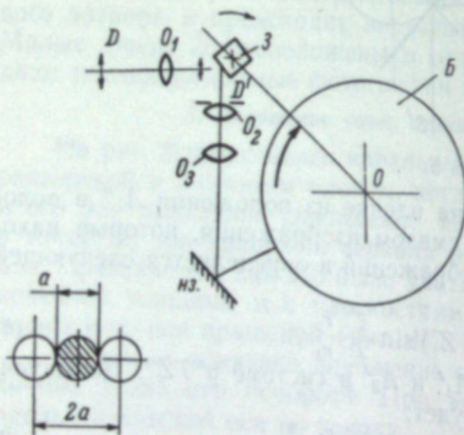


Рис. 8.

дается на пленку, которая располагается на вращающемся барабане. Расстояние от промежуточного изображения до отражающей грани четырехгранника выбирается таким, чтобы перемещение изображения

в зеркале строго соответствовало перемещению пленки с барабаном. Такая система имеет одно из основных преимуществ, которое заключается в том, что время экспонирования одного кадра значительно меньше (в $30 \div 40$ раз) межкадрового времени. Это позволяет производить съемку быстротекущих процессов без заметного ухудшения резкости изображения при малой номинальной частоте съемки.

Поскольку известно уравнение движения промежуточного изображения (улитка Паскаля), возможен геометрический анализ работы компенсатора типа СК, который показывает, что скорость движения изображения в районе пленки не является постоянной величиной, но в рабочем угле движение изображения хорошо согласуется с равномерным движением пленки и при этом обеспечивается разрешение до $30-35$ мм⁻¹. Смещение вдоль оптической оси, которое при этом имеет место, мало и не влияет на качество изображения объекта съемки.

3. Зеркальная развертка с многократным отражением

В последнее время частота съемки в лупах времени (без деления изображения) у нас и за границей достигла $2,5 \div 3,5 \cdot 10^6$ сек.⁻¹ [2, 3]. Такая частота в настоящее время не устраивает исследователей; требуется повышение частоты съемки до $10-15 \cdot 10^6$ сек.⁻¹ и выше. Частоту съемки можно повысить, применяя более быстроходные развертывающие устройства, например воздушные или газовые турбинки, которые позволяют значительно увеличить скорость вращения зеркала по сравнению с механическими системами. Используя гелиевые турбинки, в Соединенных Штатах Америки построили лупу времени для съемки с частотой $15 \cdot 10^6$ сек.⁻¹ [4]. В 1953 г. Г. Л. Шнирман предложил использовать для увеличения скорости движения луча при развертке изображения многократное отражение от наклонных отражающих граней двух синхронно вращающихся зеркальных многогранников. Однако без тщательного теоретического рассмотрения вопроса подобный прибор построить было бы невозможно. Ниже приводятся элементы теории зеркальной развертки с многократным отражением данного типа, разработанные автором.

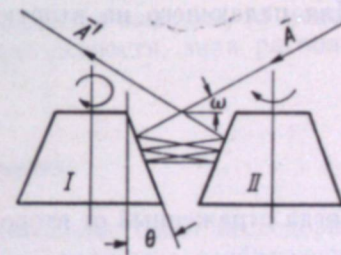


Рис. 9.

На рис. 9 луч \bar{A} после многократного отражения от отражающих граней многогранников I и II выходит из системы в виде луча \bar{A} . При вращении многогранников навстречу друг другу конец луча будет описывать в пространстве изображений некоторую дугу. Из простых геометрических соотношений получаем:

1. Угол наклона грани многогранника

$$\theta = \frac{\omega}{n}, \quad (9)$$

где ω — угол падения луча,
 n — число отражений.

2. Угол поворота луча

$$\sigma = 2n\xi, \quad (10)$$

где ξ — угол поворота многогранника.

а. Положение оптической оси в пространстве изображений

Рассмотрим прежде всего вопрос о положении оптической оси в пространстве изображений (рис. 10). Задача расчета хода луча при многократном отражении решена в векторной форме.

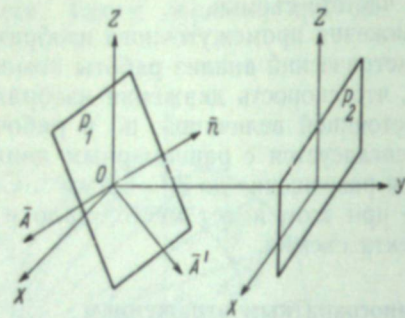


Рис. 10.

Известно уравнение отражения в векторной форме:

$$\bar{A}'_k = \bar{A}_k - 2\bar{n}_k(\bar{A}_k \bar{n}_k), \quad (11)$$

где \bar{A}_k — падающий луч,
 \bar{n}_k — нормаль к зеркалу в точке падения луча,
 \bar{A}'_k — отраженный луч,
 $(\bar{A}_k \bar{n}_k)$ — скалярное произведение векторов \bar{A}_k и \bar{n}_k .

Можно написать уравнение отраженного луча для составляющих его по осям координат. Принимая скалярные величины векторов равными

единице, получим для луча, отраженного от первой поверхности, следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha'_m &= \cos \alpha_m - 2\cos \varphi_m (\bar{A}_m \bar{n}_m), \\ \cos \beta'_m &= \cos \beta_m - 2\cos \psi_m (\bar{A}_m \bar{n}_m), \\ \cos \gamma'_m &= \cos \gamma_m - 2\cos \nu_m (\bar{A}_m \bar{n}_m). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Для падающего на вторую зеркальную грань луча будет справедливо:

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha_{m+1} &= \cos \alpha'_m, \\ \cos \beta_{m+1} &= \cos \beta'_m, \\ \cos \gamma_{m+1} &= \cos \gamma'_m. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Тогда отраженный от второй поверхности луч определится выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha'_{m+1} &= \cos \alpha_{m+1} - 2\cos \varphi_{m+1} (\bar{A}_{m+1} \bar{n}_{m+1}), \\ \cos \beta'_{m+1} &= \cos \beta_{m+1} - 2\cos \psi_{m+1} (\bar{A}_{m+1} \bar{n}_{m+1}), \\ \cos \gamma'_{m+1} &= \cos \gamma_{m+1} - 2\cos \nu_{m+1} (\bar{A}_{m+1} \bar{n}_{m+1}). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Аналогично этим можно написать выражение направляющих косинусов для лучей после каждого отражения. Кроме этого, известно, что

$$(\bar{A}_m \bar{n}_m) = \cos \alpha_m \cos \varphi_m + \cos \beta_m \cos \psi_m + \cos \gamma_m \cos \nu_m, \quad (15)$$

где $\cos \varphi_m = \cos \varphi_1$, если m — нечетное, и $\cos \varphi_m = \cos \varphi_2$, если m — четное. Из расчетов 10-кратного отражения, которые были нами проведены, следует, что геометрическим местом оптической оси является поверхность некругового конуса, образующая которого постепенно склоняется к плоскости XOY . Следовательно, геометрическим местом изображения малого элемента, каким является кадр, будет также поверхность некругового конуса.

Была изучена также скорость движения изображения при развертке данного типа (рис. 11). На рис. 11 представлена зависимость скорости

движения от угла поворота зеркальных многогранников, из рассмотрения которой следует, что для рабочего угла до 40° величина изменения скорости за счет неравномерности составляет около 0,15%. Для рабочего угла до 120° величина изменения скорости не превышает 1%. Так как

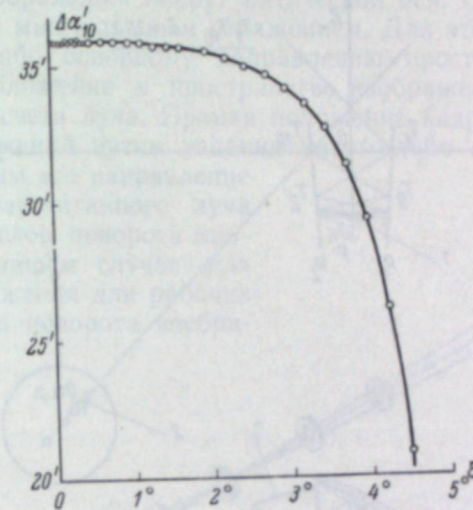


Рис. 11. График зависимости скорости развертки от угла поворота зеркал при многократном отражении.

закон изменения скорости для 10-кратного отражения известен, то можно вносить соответствующую поправку в значение скорости, зная расположение фотографической записи на пленке.

б. Положение центра развертки

Для уяснения механизма развертки необходимо было исследовать вопрос о том, вокруг каких центров происходит развертка изображения, имеется ли общий центр развертки, где может быть размещено промежуточное изображение, как это требуется при построении луп времени с коммутацией изображения, или такового нет. Для решения этой задачи были использованы данные относительно положения оптической оси в пространстве изображений. Кроме того, были определены координаты точек последнего отражения луча, выходящего из системы, для различных углов поворота зеркал ξ . Направляющие косинусы лучей и координаты точек отражения определяют положение оптической оси в пространстве изображений для каждого угла, и может быть написано уравнение отраженного луча. Решение уравнений отраженных лучей совместно с уравнением плоскости симметрии дало картину, представленную на рис. 12. Из результатов расчетов следует:

1. Центры развертки для рабочих углов до 160° лежат на одной прямой, которая является продолжением оптической оси после 10-кратного отражения при $\xi = 0$.

2. Центры развертки для рабочих углов до 40° лежат настолько близко друг к другу, что без ущерба для точности могут быть заменены одним общим центром развертки.

3. Наличие общего центра развертки позволяет использовать его для размещения в нем промежуточного изображения и построения лупы времени с коммутацией изображения.

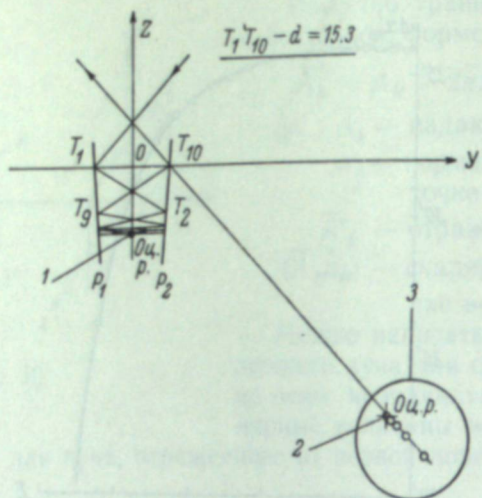


Рис. 12.

1 — положение центра развертки на луче, 2 — общий центр развертки для диапазона углов от 0 до 1° , 3 — место расположения центров развертки для углов $\xi = 0 \div 4^\circ$.

в. Выбор фокальной поверхности

Поверхность некругового конуса неудобна для размещения на ней пленки и для построения линзового блока. Известно, что плоская пленка укладывается на поверхности конуса, однако перемотка ее при этом исключена. Нами была исследована возможность замены истинного геометрического места изображений поверхностью кругового цилиндра

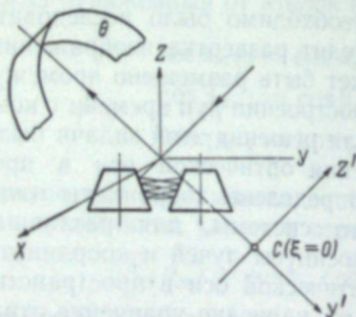


Рис. 13.

(рис. 13). На рис. 13 через центр развертки проводим систему осей $Z'CY'$. При этом ось Z' параллельна падающему лучу. На базе оси Z' как вокруг оси вращения строим поверхность цилиндра θ , которая и будет являться фокальной поверхностью прибора. Оценка дефокусировки и изменения масштаба, имеющие место благодаря тому, что выбранная фокальная поверхность не совпадает с истинной, дала возможность сделать следующие выводы:

1. При относительном отверстии $1/30$ и разрешающей способности $N=25 \text{ мм}^{-1}$ замена истинного геометрического места изображений круговым цилиндром сказывается на фокусировке при рабочем угле свыше 80° .
2. Отклонение от масштаба, вызванное смещением плоскости фокусировки, не превышает для тех же углов $0,3\%$, что вполне допустимо.
3. Геометрическое место центров линз и геометрическое место изображений не вызывает конструктивных трудностей.

г. Положение изображения в пространстве

Известно, что при зеркальной развертке светового пучка, направляемого под углом к поверхности вращающегося зеркала, имеет место поворот плоскости изображения вокруг оптической оси. Определим этот поворот в приборе с многократным отражением. Для этого просчитаем ход луча по какому-либо основному направлению пространства предметов и найдем его положение в пространстве изображений, применяя векторный способ расчета луча. Приняв положение кадровой рамки в пространстве изображений путем задания какого-либо неизменного ее направления, сравним это направление с положением рассчитанного луча для различных углов поворота многогранников. В нашем случае для 10-кратного отражения для рабочих углов до 65° угол поворота изобра-

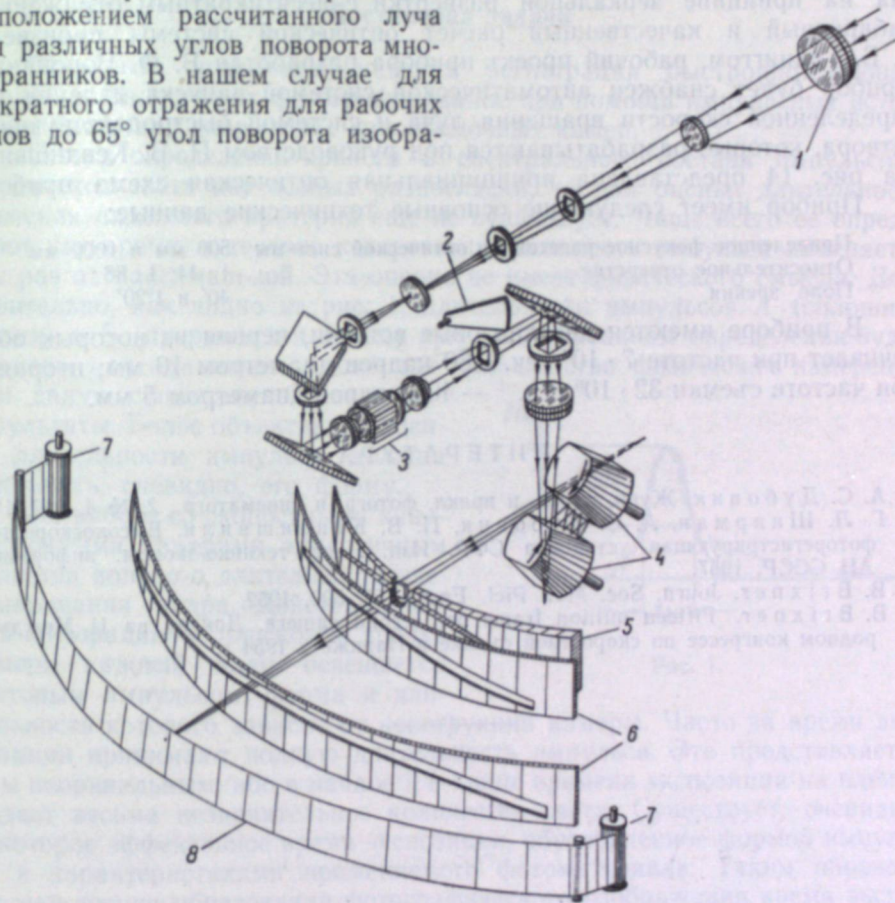


Рис. 14. Принципиальная оптическая схема установки.

1 — объектив, 2 — механический затвор, 3 — оптические детали взрывного затвора, 4 — вращающееся зеркало, 5 — линзовая вставка, 6 — диафрагма, 7 — кассета, 8 — фотопленка.

жения не превышает $4,5^\circ$, что при измерении пленки не может внести ошибки более $0,3\%$. Таким образом, поворот изображения не влияет на качество изображения и точность обработки материалов съемки.

Учитывая все вышесказанное, следует сказать, что зеркальная развертка с многократным отражением может с большим успехом применяться при построении луп времени. При этом может быть достигнута

(при сравнительно малых частотах вращения зеркальных барабанов до 60 000 мин.⁻¹) частота съемки до $40 \cdot 10^6$ сек.⁻¹. Расчет 20-кратного отражения показал полную возможность построения луп времени и с 20-кратным отражением. Это еще вдвое увеличивает частоту съемки, и она может быть доведена до $80-100 \cdot 10^6$ сек.⁻¹.

Система многократного отражения также успешно может быть применена для построения фоторегистраторов со скоростью развертки до 40—100 км/сек. и с разрешением во времени до 10^{-9} сек. Эта же система может быть применена для получения сверхкоротких импульсов света порядка 10^{-9} сек.

В настоящее время разработана оптическая система, построенная на принципе зеркальной развертки с десятикратным отражением. Габаритный и качественный расчет оптической системы произведен А. Б. Гранитгом, рабочий проект прибора разработан В. Ф. Ворониным. Прибор будет снабжен автоматической системой запуска явления при определенной скорости вращения луча и системой быстродействующего затвора, которые разрабатываются под руководством П. В. Кевлишвили. На рис. 14 представлена принципиальная оптическая схема прибора.

Прибор имеет следующие основные технические данные:

Приведенное фокусное расстояние оптической системы	500 мм и 1000 мм
Относительное отверстие	1 : 44; 1 : 88
Поле зрения	40' и 1°20'

В приборе имеются две линзовые вставки, первая из которых обеспечивает при частоте $7 \cdot 10^6$ сек.⁻¹ 80 кадров диаметром 10 мм; вторая — при частоте съемки $32 \cdot 10^6$ сек.⁻¹ — 400 кадров диаметром 5 мм.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А. С. Дубовик, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 2, № 4, 292, 1957.
- [2] Г. Л. Шнирман, А. С. Дубовик, П. В. Кевлишвили. Высокоскоростная фоторегистрирующая установка СФР. Изд. Инст. технико-эконом. информации АН СССР, 1957.
- [3] В. Vrixner, Journ. Soc. Mot. Pict. Engrs, 59, 502, 1952.
- [4] В. Vrixner. Fifteen million frame per second camera. Доклад на II Международном конгрессе по скоростной съемке в Париже в 1954 г.

Л. А. ВАСИЛЬЕВ, Е. А. ТАРАНТОВ

ОБ ЭФФЕКТИВНОМ ВРЕМЕНИ СВЕТОВОГО ИМПУЛЬСА

Постановка задачи

Основным оптическим методом регистрации быстропротекающих процессов является их фотографирование при помощи импульсных источников света или скоростных киносъемочных камер.

Если в определении яркости и спектрального состава импульсных источников света нет особых разногласий, то для оценки длительности свечения надежного критерия еще не существует. Чаще всего ее определяют как время, в течение которого интенсивность импульса изменяется в e раз от максимальной. Эта оценка не имеет физического смысла. Действительно, как видно из рис. 1, длительности импульсов A (сплошная линия) и B (прерывистая линия) при вышеуказанном определении будут оценены как одинаковые, хотя для большинства физических измерений они дадут существенно различные результаты. Более объективная оценка длительности импульса должна учитывать, очевидно, его форму.

При работе со скоростными киносъемочными камерами аналогичным является вопрос о длительности экспонирования кадра. Действительно, при обтюрации в плоскости зрачка камеры каждый кадр освещается световым импульсом, форма и длительность которого зависит от конструкции камеры. Часто за время экспозиции принимают полную длительность импульса. Это представляется нам неправильным, ибо в начале и в конце времени экспозиции на пленку падает весьма незначительное количество света. Существует, очевидно, некоторое эффективное время экспозиции, обусловленное формой импульса и характеристиками применяемого фотоматериала. Таким образом, с точки зрения образования фотографического изображения время экспонирования при съемке скоростной камерой аналогично длительности вспышки импульсного источника света при фотографировании с импульсным освещением. Поэтому для общности дальнейших рассуждений мы будем говорить просто о световом импульсе.

В данной работе нами делается попытка установить оценку длительности светового импульса, исходя из требований фотографии.

Эффективная длительность импульса

При фотографировании движущихся предметов длительность импульса сказывается на степени размазывания границ изображения. Пусть движущийся объект освещается импульсом заданной формы (рис. 2). За

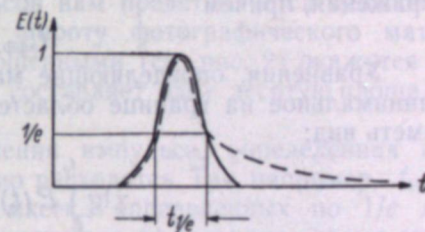


Рис. 1.

время t_0 (полная длительность импульса) изображение предмета сдвинется на некоторое расстояние x_0 (рис. 3), определяемое скоростью движения предмета и масштабом изображения.

На участки негатива, соответствующие областям 1 и 5 (рис. 3), упадет небольшое количество света. Если максимальное количество освещения, упавшее на любую точку участков 1 и 5, столь мало, что его

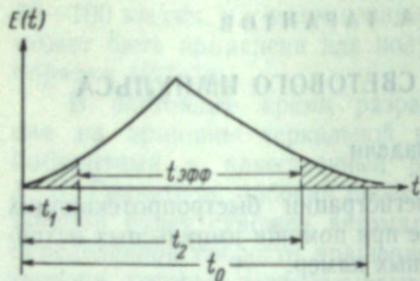


Рис. 2.

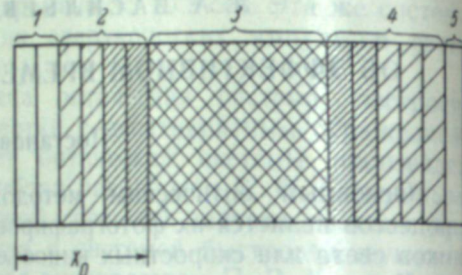


Рис. 3.

недостаточно для образования на применяемом при данной съемке негативе плотности большей, чем плотность вуали, то видимый сдвиг изображения будет определяться величиной областей 2 и 4. Естественно принять за длительность свечения не полное время его существования, а некоторый другой критерий — время $t_{эфф.}$, определяющее видимый сдвиг изображения, причем

$$t_{эфф.} = t_2 - t_1. \quad (1)$$

Уравнения, определяющие максимальное почернение в области 3 и минимальное на границе областей 1—2 и 4—5, будут соответственно иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \gamma \lg \int_0^{t_2} E(t) dt - i &= S_{max.}, \\ \gamma \lg \int_0^{t_1} E(t) dt - i &= S_{min.}, \\ \gamma \lg \int_2^{t_0} E(t) dt - i &= S_{min.}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где γ — контрастность фотоматериала, i — константа для данного фотоматериала, $E(t)$ — функция, определяющая зависимость интенсивности импульса от времени. Принимая

$$\frac{S_{max.} - S_{min.}}{\gamma} = h, \quad (3)$$

получим

$$\int_0^{t_2} E(t) dt = \int_0^{t_1} E(t) dt + \frac{1}{10^h} \int_2^{t_0} E(t) dt. \quad (4)$$

Подставив вместо $E(t)$ выражение, определяющее конкретную зависимость $E = E(t)$, можно из (4) найти t_1 и t_2 , а затем из уравнения (1) — $t_{эфф.}$. Так, например, формулы для $t_{эфф.}$ камеры ФП-22 легко выводятся при замене t_1 на $t_0 - t_2$ (подстановка справедлива ввиду симметричности импульса). Легко провести подобные расчеты и для ряда других камер.

Например, для камеры СФР (лупа времени)

$$t_{эфф.} = t_0 \left(1 - \frac{1}{10^{1/2}}\right). \quad (5)$$

На величину $t_{эфф.}$ можно влиять соответствующим подбором фотоматериалов и условий их обработки.

Сдвиг границ будет тем большим, чем больше $t_{эфф.}$. Для выявления максимального количества деталей изображения объекта на снимке необходимо, чтобы самые плотные его места находились в конце прямолинейного участка характеристической кривой. В этом случае h представляет собой вполне определенную физическую величину — фотографическую широту пленки, а эффективная длительность импульса будет определять максимально возможную на данном фотоматериале величину сдвига границы изображения.

Так как в наших рассуждениях на физическую природу импульса, его форму и длительность не накладывалось никаких ограничений, то данный критерий применим ко всем импульсным источникам света (искра, импульсная лампа и т. д.) и камерам, в которых кадр освещается световым импульсом, переменным во времени. Этот критерий вполне реален и имеет в отличие от $1/e$ физический смысл.

Из всего изложенного ясно, что так как форма светового импульса существенно влияет на величину $t_{эфф.}$, то для полной характеристики световых импульсов необходимо знать их форму, полученную фотоэлектрически или на временных фотографических развертках.

Для сравнения различных импульсов нам представляется целесообразным выбрать некоторую среднюю широту фотографического материала, например, единицу. Тогда отброшенными (см. рис. 2) окажутся те участки, площадь каждого из которых составляет одну десятую площади всего импульса.

В ряде случаев длительность свечения импульса, определенная по данному критерию и по $1/e$, существенно расходятся. Так, например, $t_{эфф.}$ импульсных ламп повысится от 0,2 мксек., определенных по $1/e$ до 0,6 мксек. При учете формы светового импульса эффективное время экспозиции камеры ФП-22 оказывается равным 9 мксек. (вместо 20 мксек.).

Выводы

1. Время экспозиции киносъемочных камер и длительность световой вспышки для импульсных источников света, часто приводимые в литературе, определяются без учета специфики фотографических работ, а применяемый критерий $1/e$ не соответствует реальной длительности импульса.

2. Для полного учета явлений, связанных с конечной длительностью импульса, необходимо знать форму импульса.

3. Установлена зависимость эффективной длительности свечения от формы светового импульса и свойств фотоматериала, приведена общая формула, выражающая эту зависимость.

4. Предлагается в технических характеристиках, прилагаемых к импульсным источникам света и съемочным камерам, указывать форму светового импульса и эффективную длительность свечения для какого-то одного фотоматериала, например для пленки, имеющей фотографическую широту, равную единице.

С. Н. СИДОРОВ

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ТУРБИННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ФОТОРЕГИСТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В связи с необходимостью увеличения скорости вращения зеркал фотохронографов в кинофототехнике встал вопрос о применении малогабаритных высокоскоростных турбинных двигателей с использованием энергии истечения газов гелия или воздуха.

В 1957 г. были спроектированы, изготовлены и испытаны малогабаритные турбинные двигатели, обеспечивающие вращение зеркала с частотой $240\,000 \div 360\,000$ мин.⁻¹.

В турбинном двигателе в качестве рабочего газа, обладающего запасом энергии для приведения в движение малогабаритных колес и зеркала, при первых испытаниях использовался воздух, как наиболее дешевый и безопасный газ.

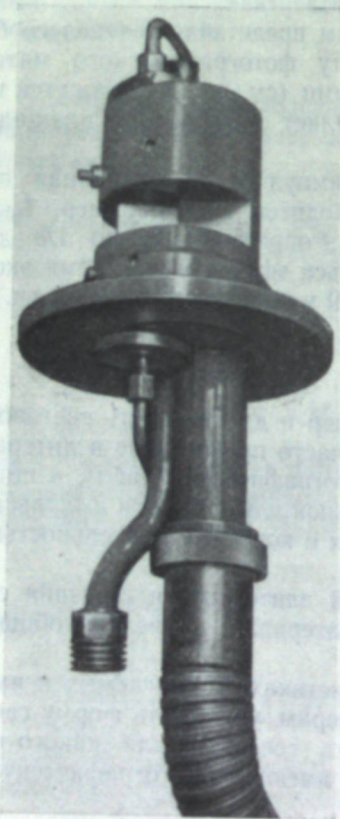


Рис. 1. Общий вид турбинного двигателя.

Конструкция и принцип работы осевого турбинного двигателя

Турбинный двигатель (рис. 1 и 2) состоит из стального корпуса 1, в котором вращается зеркало 2 на двух подшипниках скольжения 3 и 4. Зеркало размером $6 \times 15 \times 29$ мм приводится во вращение от двух турбинных колес, расположенных на оси зеркала. Основным узлом высокоскоростного осевого турбинного двигателя является проточная часть (рис. 3). Кинетическая энергия, полученная при истечении воздуха из сопловой части и турбинного колеса, используется для вращения турбины и зеркала.

Давление, оказываемое струей газа на лопатки турбины, зависит от скорости струи, формы поверхности лопаток, сечения проточных каналов и от угла, образованного между направлением струи и поверхностью лопатки. Протекание воздуха в проточной части может происходить по схемам с активным и реактивным действием турбины.

Отличительным признаком турбины активного действия (рис. 4) является преобразование потенциальной энергии в ки-

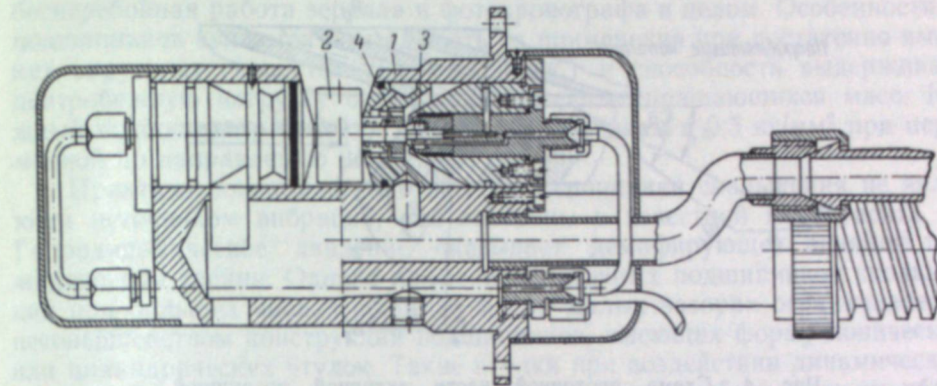


Рис. 2. Схема турбинного двигателя.

нетическую только в соплах, вследствие чего лишь в них происходит расширение газа, а давление по обе стороны рабочих лопаток остается одинаковым. Относительная скорость ω при входе воздуха в рабочее колесо

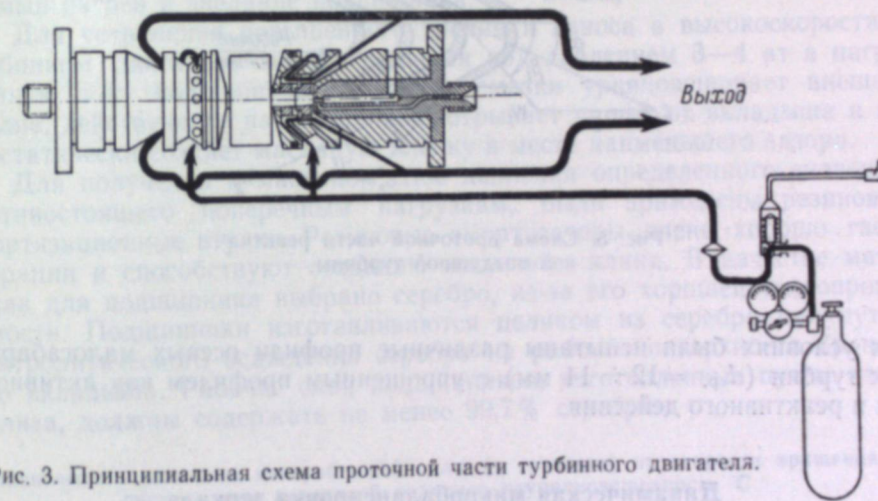


Рис. 3. Принципиальная схема проточной части турбинного двигателя.

рость c_2 выхода воздуха из рабочего колеса. Для лучшего преобразования кинетической энергии потока воздуха в механическую работу на валу турбины необходимо выполнение оптимального соотношения между скоростью истечения воздуха и окружной скоростью рабочего колеса при малых значениях α_1 , которое характеризуется соотношением

$$\left(\frac{U}{c_1}\right)_{\text{opt}} \approx \frac{1}{2}.$$

Отличительным признаком турбины реактивного действия (рис. 5) является преобразование потенциальной энергии газа в кинетическую не только в соплах, но и на турбинных лопатках. В данном случае вращающий момент возникает как вследствие отклонения потока во время протекания его через рабочее колесо, так и благодаря силе реакции от ускорения потока.

Проектирование и расчет экспериментальных образцов малогабаритных воздушных турбин проводились с учетом факторов, влияющих на максимальное увеличение числа оборотов турбинного колеса. В лаборатор-

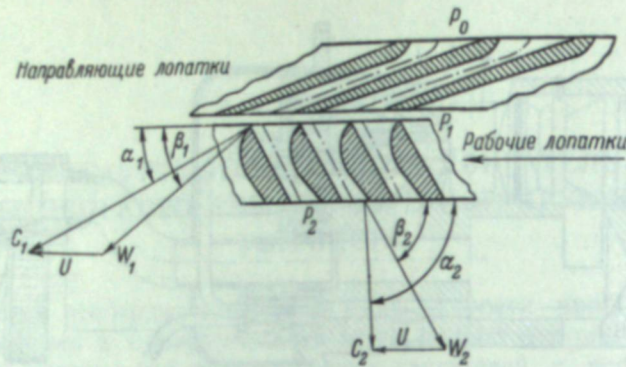


Рис. 4. Схема проточной части активной воздушной турбины.

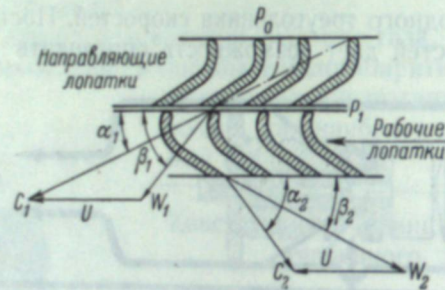


Рис. 5. Схема проточной части реактивной воздушной турбины.

ных условиях были испытаны различные профили осевых малогабаритных турбин ($d_{ср.} = 12 \div 14$ мм) с упрощенным профилем как активного, так и реактивного действия.

Динамическая микробалансировка зеркала

Практически каждое вновь изготовленное зеркало после механической обработки может иметь неуравновешенность. Главная причина неуравновешенности появляется от наличия неравномерной шлифовки и доводки граней зеркала. Под действием неуравновешенной силы или циркуляционных динамических нагрузки, передающиеся на подшипники в виде вибраций, частота которых равна частоте вращения зеркала (см. таблицу).

Вибрации, влияя на опорные подшипники, ограничивают скорость вращения зеркала. Поэтому уравновешивание зеркала является обязательным. Уравновешивание зеркала с турбинным колесом производилось на станках отечественного производства ДБ-4 и А-21 с точностью $0,001 \div 0,00001$ г·см.

Подшипники скольжения с принудительной смазкой под давлением

Опорные подшипники являются одними из ответственных узлов турбинного двигателя. От долговечности подшипников во многом зависит бесперебойная работа зеркала и фотохронографа в целом. Особенности подшипников являются возможность их применения при достаточно высоких окружных скоростях ($50 \div 60$ м/сек.) и способность выдерживать центробежную нагрузку от неуравновешенных вращающихся масс. Каждый подшипник работает с удельным давлением в $0,5$ кг/мм² при переменной по направлению нагрузке.

Практика показывает, что обычно подшипники скольжения не являются источником вибраций, они способны в известной мере гасить ее. Гидродинамическое давление оказывает демпфирующее влияние при жидкостном трении. Однако применение обычных подшипников скольжения при больших числах оборотов и при малых зазорах ограничивается несовершенством конструкции подшипников, имеющих форму конических или цилиндрических втулок. Такие втулки при воздействии динамических сил, возникающих при недостаточно сбалансированной системе, не обладают способностью самоустанавливаться соответственно линии прогиба вала. В результате прогиба вала происходит перекокс цапфы по отношению к втулке подшипника. Смазка выжимается из зазора, при этом возникает сухое трение между краем втулки и цапфой, что вызывает недопустимый нагрев и заедание подшипника.

Для устранения повышенного трения и износа в высокоскоростном турбинном двигателе смазка подается под давлением 3—4 ат в нагруженную зону подшипника. Давление смазки уравновешивает внешнее усилие, действующее на подшипник, отрывает цапфу от вкладыша и гидростатически создает масляную пленку в месте наименьшего зазора.

Для получения в масляном слое давления определенного значения, противостоящего поперечным нагрузкам, были применены резиновые амортизационные втулки. Резиновые амортизаторы очень хорошо гасят вибрации и способствуют созданию масляного клина. В качестве материала для подшипника выбрано серебро, из-за его хорошей теплопроводности. Подшипники изготавливаются целиком из серебра или путем электролитического осаждения серебра на рабочие поверхности бронзового вкладыша. Рабочие слои подшипников, изготовленные путем электролиза, должны содержать не менее 99,7% серебра.

Зависимость величины центробежной силы (в граммах) от скорости вращения системы при различной величине неуравновешенности С

n (в об/мин.)	С (в г·см)			
	0,0001	0,001	0,01	0,1
60000	4 г	40 г	400 г	4000 г
100000	11	110	1100	11000
150000	25	250	2500	25000
200000	44	440	4400	44000
250000	68	680	6800	68000
300000	99	990	9900	99000
350000	130	1300	13000	130000
400000	180	1800	18000	180000
450000	220	2200	22000	220000
500000	270	2700	27000	270000
550000	330	3300	33000	330000
600000	390	3900	39000	390000

После окончательной механической обработки рабочая поверхность серебряного подшипника покрывается слоем свинца. Прирабатываемость подшипника обеспечивается наличием тонкого слоя пластичного свинца. Кроме того, предварительно серебряные подшипники тщательно собираются. Процесс приработки должен проводиться особенно осторожно. Рекомендуется обкатка в течение нескольких часов при малых оборотах зеркала. Зазор между подшипником и цапфой составляет $7 \div 10$ мк. Применялась смазка марки ЦКП-4. При испытании осуществлялось около 50 запусков. Продолжительность каждого запуска составляла 30 сек.

Выбор материала для зеркал

В процессе первых испытаний турбинного двигателя зеркало было изготовлено из стали различных марок. Зеркало размером $6 \times 15 \times 29$ мм, изготовленное из стали марки 20х с $\sigma_s = 85$ кг/мм², при вращении от возникновения центробежных сил разорвалось при $n = 300\,000$ об./мин. Зеркало размером $6 \times 15 \times 28$ мм, изготовленное из стали марки 45х с $\sigma_s = 90$ кг/мм², разорвалось при частоте вращения $320\,000$ мин.⁻¹. Зеркало размером $6 \times 16 \times 28$ мм, изготовленное из стали марки х12 с $\sigma_s = 100$ кг/мм², разорвалось при вращении с частотой $360\,000$ мин.⁻¹.

Для надежной работы зеркала при $240\,000$ об./мин. можно использовать сталь марки 40хс и 37х НЗА (х44) с $\sigma_s = 200-220$ кг/мм.

Выводы

На основании результатов испытания турбинных двигателей можно рекомендовать конструкцию малогабаритного аксиального турбинного двигателя для вращения зеркала размером $6 \times 15 \times 28$ мм с частотой $240\,000$ мин.⁻¹ в фотохронографах или лупах времени.

Л. А. САМУРОВ

ОПТИЧЕСКИЕ УСКОРИТЕЛИ И НОВАЯ СХЕМА СВЕРХСКОРОСТНОЙ КИНОКАМЕРЫ

Введение

В оптико-механических камерах для высокоскоростных съемок с нормальными, не рассеянными изображениями предел частоты съемки ставит не чувствительность фотоматериалов или яркость источников света, а в конечном счете механическая прочность либо самой пленки, либо быстро вращающихся частей камер: обтюраторов, зеркал, подшипников, барабанов и т. д.

Один из возможных путей повышения частоты съемки сводится к чрезвычайному форсированию кинематики камер, применению сверхпрочных материалов для вращающихся частей, использованию скоростных турбинок, приводящихся в движение сжатым гелием, использованию специальных подшипников, применению вакуума и других технических средств, необходимых для достижения больших скоростей вращения [1].

Не случайно поэтому стали применяться съемки с рассеянием изображения [2, 3], которые позволяют избежать ряд трудностей, связанных с быстрым вращением частей камеры, и легко реализовать огромные частоты съемки. Однако изображение в этом случае по принципиальным причинам зачастую имеет невысокое качество, а кроме того, для растровой системы съемки возможно получение лишь ограниченного количества кадров, да и само понятие «кадр» теряет свой обычный смысл. Съемки, сделанные этим методом, не дают фильмы, пригодные для кинопроекции на экран без предварительной пересъемки.

Поэтому представлялось заманчивым сделать попытку решения задачи сверхскоростной съемки без расчленения изображения на элементы, с получением сразу нормальных кинокадров, пригодных для кинопроекции. В основу нашего метода была положена такая механика камеры, в которой с огромной скоростью вращается луч, а не механические детали камеры. Нами в 1951 г. был предложен метод повышения угловой скорости вращения луча с помощью оптического ускоряющего устройства, схема которого была разработана в двух вариантах в 1955 г. [4].

Оптический ускоритель

Известно, что призма Дове за один оборот вокруг своей оси поворачивает изображение на два оборота, вращая его в том же направлении, в котором вращается сама. Если поставить одну за другой ряд таких призм и вращать их с одинаковой угловой скоростью, но поочередно в противоположных направлениях, то каждая из призм добавит к вращению изображения удвоенную собственную скорость вращения. В результате этого изображение будет вращаться быстрее самих призм

в $2n$ раз, где n — количество использованных призм. При использовании большого количества таких призм можно получить быстрое вращение изображения, значительно превосходящее скорость вращения самих элементов такого устройства.

Однако само по себе быстрое вращение изображения, получаемое от вращающихся призм, еще ничего не дает. Для того чтобы реализовать это вращение, например, в схеме многообъективной камеры с одним общим зрачком входа, мало заставить изображение просто вращаться во-

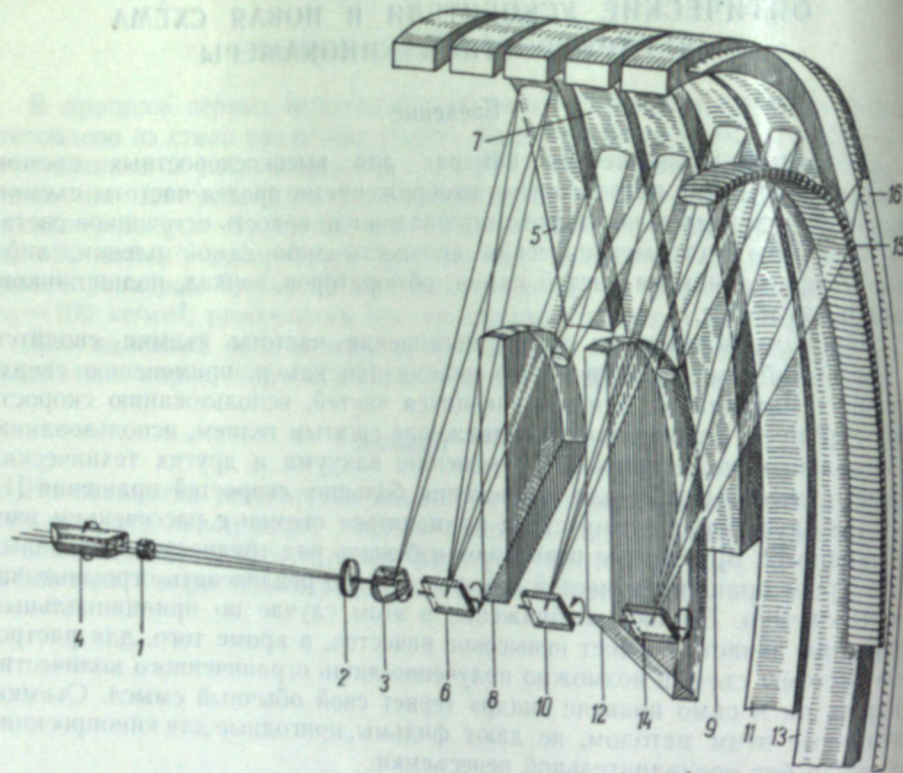


Рис. 1. Оптический ускоритель с нечетным K .

круг оси симметрии, — следует обеспечить обегание главным лучом заданной поверхности, т. е. необходимо, чтобы главный луч пучка по выходе из ускорителя описывал коническую поверхность, симметричную относительно оси системы, или же плоскость, нормальную к оси вращения.

Конкретное решение такого ускорителя, с учетом целого ряда дополнительных условий, приводит к сложным схемам. Однако при всей своей сложности устройство с призмами Дове или эквивалентными ей системами имеет то преимущество, что позволяет осуществить «ждушую» камеру, т. е. готовую к съемке в любой заданный момент.

Оптический ускоритель может быть осуществлен и с помощью зеркал, что ведет к сравнительно простым схемам, но не дает возможности сделать камеру «ждушей».

Известно, что вращающееся плоское зеркало отклоняет отраженный луч на удвоенный угол своего поворота. Это свойство зеркал также может быть использовано для построения оптического ускорителя сканирующего луча.

Если взять ряд плоских зеркал, расположить их в одну линию и заставить вращаться поочередно навстречу друг другу, а дополнительной оптикой последовательно переносить изображение с одного вращающегося зеркала на другое, то луч света, вошедший в систему, в результате прохождения через такой ускоритель, приобретает радиальное вращение, многократно ускоренное по отношению к скорости вращения самих зеркал.

Коэффициент ускорения или число оборотов луча, приходящееся на один оборот зеркал ускорителя, может быть четным или нечетным в зависимости от конкретной схемы.

На рис. 1 изображен вариант схемы с нечетным коэффициентом повышения угловой скорости луча.

Зеркало 3, вращающееся за объективом 1 и коллективом 2 наклонно к оси вращения и являющееся первой диафрагмой поля зрения, не удваивает скорости луча, а зеркала 6, 10 и 14, своей отражающей поверхностью лежащие на оси вращения, добавляют сканирующему лучу удвоенную собственную скорость вращения. Поэтому для этого варианта устройства коэффициент повышения угловой скорости вращения луча будет нечетным:

$$k = 2P - 1,$$

где P — число отражающих поверхностей, вращающихся с одинаковой угловой скоростью в противоположных направлениях.

Число оборотов луча N при числе оборотов зеркал n в единицу времени составляет

$$N = (2P - 1)n.$$

Призма Дове 4 служит для стабилизации поворота изображения, вызываемого вращением зеркала 3. Сферические вогнутые зеркала 5, 7, 9, 11 и 13, выполненные в виде элементов шаровых поясов с центрами кривизны, лежащими на оси системы, совместно с концентрическими выпуклыми сферическими зеркалами 8 и 12 переносят изображение последовательно с одного вращающегося зеркала на другое в масштабе 1:1.

Для создания обтюрации, обеспечивающей последовательное экспонирование кадра за кадром, параметры сферических зеркал и сила коллектива задаются так, чтобы изображение зрачка входа в итоге было перенесено на линзовый пояс 15, за которым расположена неподвижная киноплёнка 16.

Если все плоские вращающиеся зеркала взять однотипными, как показано на рис. 2, то можно получить схему с четным коэффициентом k повышения угловой скорости вращения луча. Для этой схемы

$$k = 2P$$

и соответственно число оборотов луча в единицу времени

$$N = 2Pn.$$

Преимуществом этого варианта является отсутствие призмы Дове, выполнявшей вспомогательную роль в первом варианте, а также то, что его коэффициент k для равного числа вращающихся элементов на единицу больше.

Как видно из приведенных схем оптического ускорителя с плоскими зеркалами, ускоренный луч может быть использован только на части окружности, всегда меньшей 180° , вследствие того, что плоское зеркало при своем повороте проходит положение, при котором проекция его площади обращается в линию, а следовательно, высота кадра на пленке становится при этом равной нулю.

Для проверки оптических свойств ускорителя нами в 1955 г. был рассчитан, разработан конструктивно и построен макет прибора по схеме, приведенной на рис. 1, с коэффициентом ускорения $k=7$.

В построенном макете фокусное расстояние системы составляло 40 мм, относительное отверстие, различное в двух меридианах, было эквивалентно 1:12, поле зрения (по диагонали кадра) — $8^{\circ}30'$. Съемка производилась на нормальную 8-миллиметровую кинолентку на формат

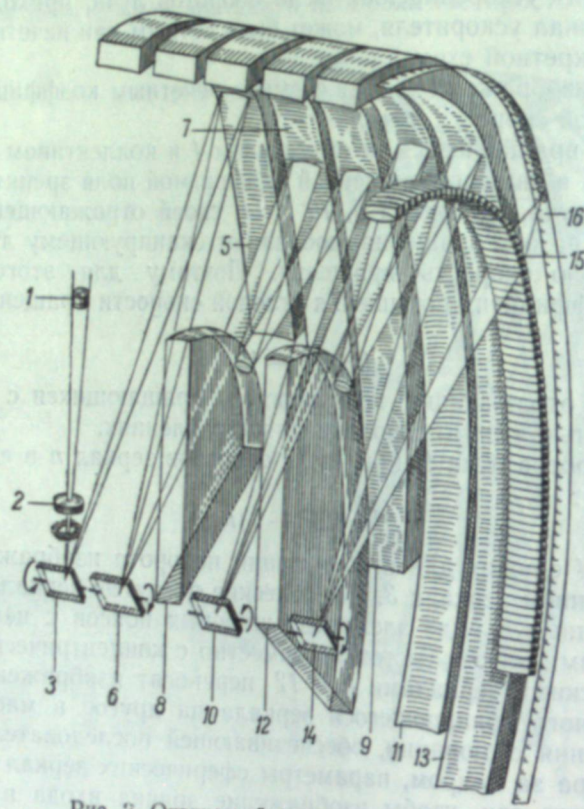


Рис. 2. Оптический ускоритель с четным K .

кадра $3,6 \times 4,8$ мм. Фотография макета камеры со снятыми крышками приводится на рис. 3.

Испытания макета показали, что фактический коэффициент повышения угловой скорости радиального вращения луча находится в полном соответствии с зависимостью, вытекающей из теории для данного варианта схемы. Качество изображения и разрешение на пленке высокое (47 мм^{-1} в трех направлениях и 54 мм^{-1} в четвертом), снимки не обладают заметным искажением и пригодны для измерительной обработки. Использование оптического ускорителя в реальной камере потребует применения скоростного затвора (во избежание многократного экспонирования одних и тех же мест пленки), кроме того, вследствие весьма малой продолжительности съемки будет необходима хорошая система синхронизации работы затвора камеры с моментом включения снимаемого явления и включением источника света.

Для того чтобы ускорить луч в 10 раз, требуется 5 вращающихся и много вспомогательных зеркал. Для уменьшения количества оптических деталей и габаритов камеры схема ее может быть автоколлимационной. Для этого нужно построить прибор так, чтобы ускоряемый луч

дважды проходит вращающиеся зеркала. Тогда десятикратное ускорение луча можно получить всего лишь при трех вращающихся зеркалах.

Коэффициент ускорения для автоколлимационной схемы ускорителя

$$k = (2P - 1)2,$$

а число оборотов луча при n оборотах в единицу времени

$$N = (2P - 1)2n.$$

Интересно отметить, что в автоколлимационной схеме ускорителя с двухкратным прохождением луча независимо от количества вращаю-

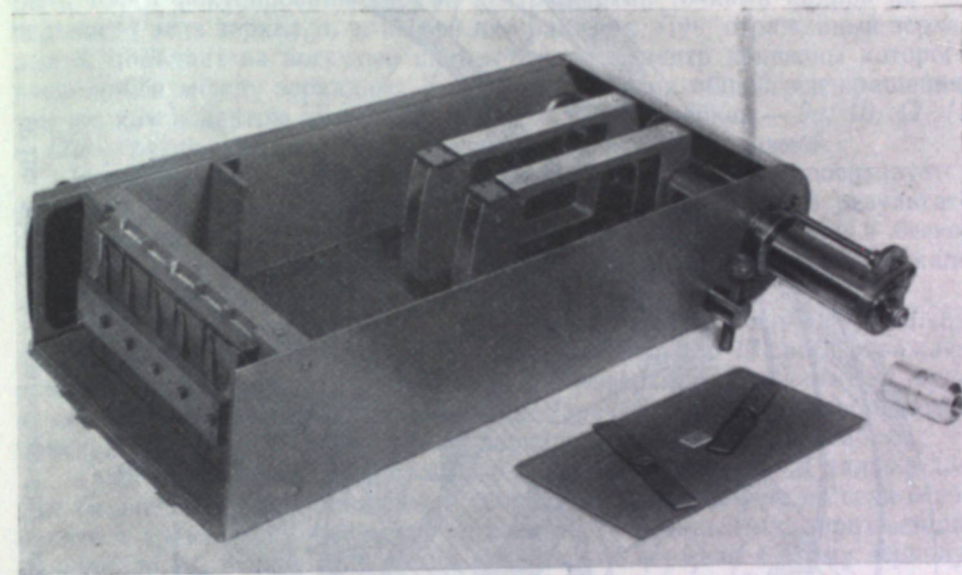


Рис. 3. Макет камеры.

щихся зеркал коэффициент k всегда будет четным и для числа зеркал $P=1, 2, 3, 4, 5$ и т. д. будет составлять соответственно ряд: 2, 6, 10, 14, 18 и т. д.

Возможны автоколлимационные схемы и с многократным числом прохождений луча по вращающимся зеркалам, что может дать еще более значительный выигрыш в ускорении луча при малом числе вращающихся зеркал.

Схема оптики камеры

На рис. 4 изображена автоколлимационная схема камеры с затвором и двухканальной системой синхронизации.

Объектив 1 совместно с коллективом 2 изображает удаленный объект на оси вращающегося зеркала 3, отражающая плоскость которого совпадает с этой осью. Зеркало 3 служит своеобразным оптическим затвором. Изображение квадратного зрачка входа объектива 1 коллективом 2 проектируется (после отражения от зеркала 3) на объектив 4, зрачок которого имеет прямоугольную форму. Объектив 4 переносит изображение с оси вращения зеркала затвора на коллектив 5 с уменьшением в 4 раза.

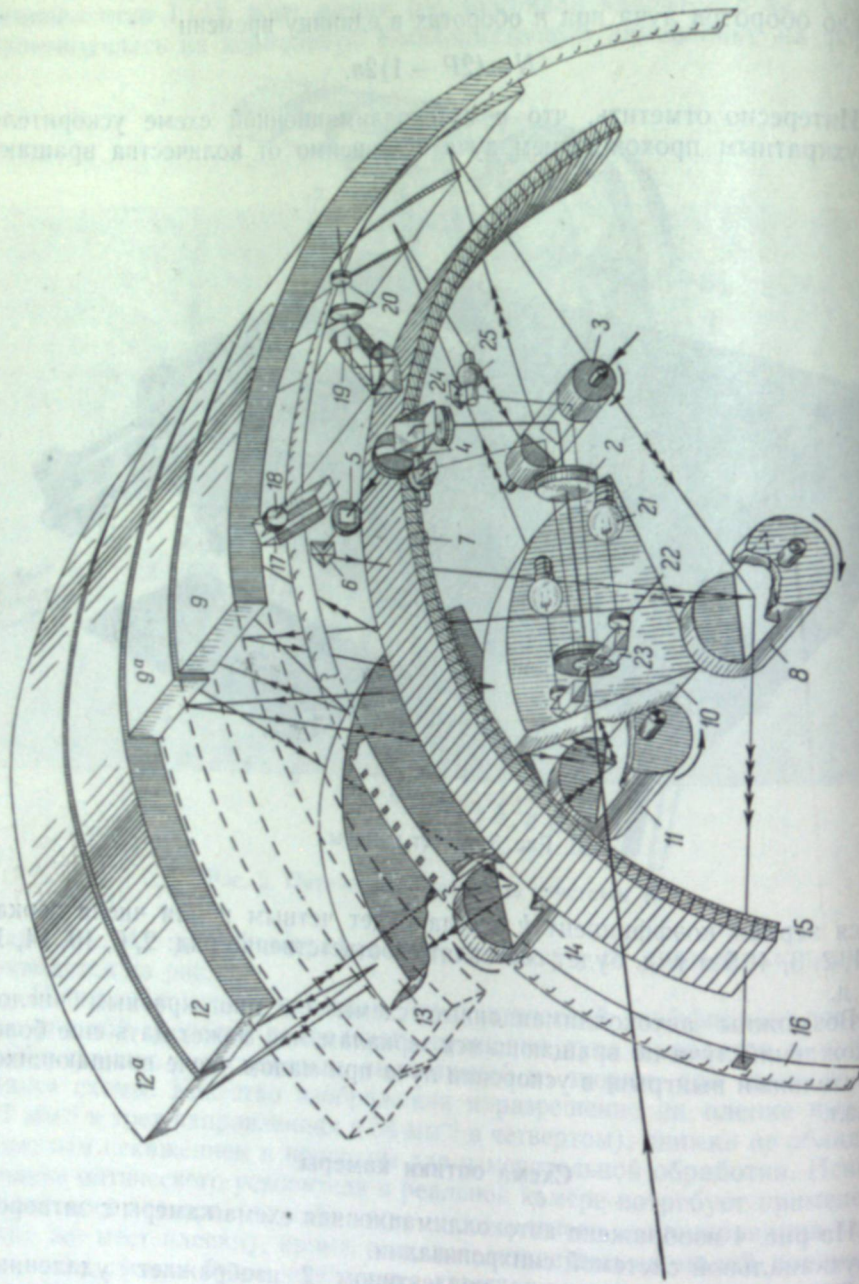


Рис. 4. Схема оптики сверхскоростной кинокамеры ФП-38

Внутри коллектива 5 находится диафрагма поля зрения, по форме и размерам соответствующая кадру на пленке. Призма 6 ломает оптическую ось под углом и посылает пучок света на объектив 7. Коллектив 5 переносит изображение зрачка входа объектива 4 с трехкратным увеличением на объектив 7. Объектив в свою очередь проецирует изображение, ограниченное диафрагмой поля зрения коллектива 5, на первое вращающееся плоское зеркало 8 с осью вращения, совпадающей с его отражающей поверхностью, так же как и в других зеркалах оптического ускоряющего устройства — 11 и 14. Длинная сторона изображения кадра ориентирована вдоль оси вращения этих зеркал. Во избежание сдвига изображения (в дальнейшем на пленке) изображения на зеркалах 8, 11 и 14 должны быть точно сфокусированы своими центральными точками кадров на поверхности этих зеркал, т. е. на оси их вращения. Луч, отраженный зеркалом 8, попадает на вогнутый шаровой пояс 9, центр кривизны которого расположен между зеркалами 8 и 11 на линии их общей оси вращения, так же как и центры кривизны всех сферических зеркал — 9а, 10, 12, 13 и 12а — расположены в соответствующих точках этой прямой.

Изображение свободного отверстия объектива 7 проецируется зеркалом 9 и выпуклым зеркалом 10 в фокус зеркала 9а. В результате изображение зрачка входа после зеркала 9а будет отброшено в бесконечность, а изображение объекта с зеркала 8 будет перенесено на зеркало 11 в масштабе 1 : 1.

Далее все повторяется как в предыдущем случае с зеркалами 12, 13, 12а и 14, с той только разницей, что выпуклое зеркало 13 своей отражающей поверхностью находится в фокальной поверхности зеркала 12а, куда и переносится очередное изображение зрачка входа, а изображение объекта с зеркала 11 поступает на зеркало 14 в том же масштабе.

Такое чередование зеркал можно было бы продолжать и дальше для еще большего повышения угловой скорости вращения луча, но если ограничиться тремя вращающимися зеркалами, то главный луч, приходящий на зеркало 14, отразится обратно в плоскости нормали к этому зеркалу, и поэтому изображения объекта вследствие своеобразной автоколлимации будут последовательно переноситься в обратном порядке на зеркала 11 и 8. Зеркала 8, 11 и 14 вращаются с одинаковой угловой скоростью, но навстречу одно другому, и при каждом новом отражении от них к радиальному вращению луча добавляется удвоенная угловая скорость вращения каждого из зеркал.

Таким образом удается с помощью трех вращающихся зеркал получить пятикратное отражение от них и, следовательно, в 10 раз повысить скорость вращения луча.

Центральное расположение зеркал внутри концентричных шаровых поясов обеспечивает совершенно равноценные свойства системы для прохождения луча света в любом радиальном направлении в пределах сектора 180°. Этим обеспечиваются постоянство угловой скорости обегавшего луча при равномерном вращении зеркал ускорителя, неизменность масштаба изображения и цилиндрическая или слабо коническая форма дуги, по которой располагается пленка.

Десятикратно ускоренный луч скользит по венцу с объективами 15, которые переносят изображение с зеркала 8 на кинопленку 16 в масштабе 1 : 0,25.

Вследствие обратимости в автоколлимационной системе скользящее изображение зрачка объектива 7 совпадает с поверхностью линз 15 и является обтюратором, обеспечивающим при съемке последовательное экспонирование кадра за кадром на пленке. Призма 6, вводящая пучок света

в систему, имеет ширину, соизмеримую с шириной кадра, экранирует его и поэтому на пленке этот кадр будет пропущен.

Микроскоп 20-кратного увеличения, состоящий из призмы 17, объектива 18, оборачивающих призм 19 и окуляра 20, служит для рассматривания кадра перед съемкой. Для наблюдения поля зрения прибора блок микроскопа поворотным движением вводится в пучок света после коллектива 5. Микроскоп при этом сфокусирован на плоскость диафрагмы коллектива, с которой совпадает изображение предмета съемки. Видимое увеличение всей системы как визиера — $3,4\times$. Синхронизация запуска снимаемого процесса с началом съемки осуществляется с помощью устройства, которое состоит (в оптической части) из источника света 21, поме-

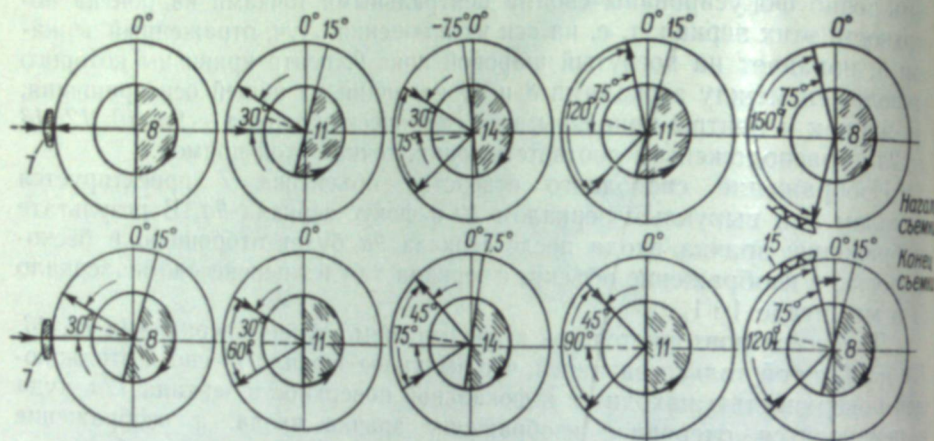


Рис. 5. Ориентировка зеркал ускорителя.
Верхний ряд — исходное положение. Нижний ряд — конечное положение.

щенного в фокусе объектива 22, призмы 23, направляющей свет через щелевое отверстие, находящееся сбоку от зрачка объектива 1, на зеркало 3, затем на призму 24 и на фотоэлемент 25.

Коллектив 2 изображает щелевой вырез объектива 1 на щели призмы 24.

При вращении зеркала 3 фотоэлемент получает кратковременный световой импульс (в момент совпадения движущегося изображения щели с неподвижной щелью перед фотоэлементом), и через усилительное устройство (исполнительный орган) производит запуск процесса, предназначенного для съемки.

Идентичное устройство, расположенное симметрично первому, служит для запуска импульсного источника света. Призма 24 с фотоэлементом 25 может быть перемещена по дуге окружности вокруг оси, совпадающей с осью вращения зеркала 3, для создания определенного упреждения по времени между моментом сигнала фотоэлементу и моментом съемки, когда изображение зрачка входа камеры скользит по щелевому вырезу на объективе 4. То же относится и ко второму каналу синхронизации, служащему для запуска импульсного источника света.

Вращение затворного зеркала 3 кинематически связано с вращением зеркал оптического ускорителя так, что когда изображение зрачка входа системы скользит по щелевой диафрагме объектива 4, ускоренный луч выходит на линзовый венец, обегает его, завершая съемку. При этом каждое из зеркал ускорителя поворачивается всего лишь на угол 15° , в то время как луч на пленке обегает дугу в 150° , после чего наступает период,

когда ни один луч не попадает на венец с объективами, пока вращающиеся зеркала вновь не придут в исходное положение. Вот эта «скважность», т. е. периодически прерывающаяся готовность камеры к съемке, и не позволяет построить «ждушую» камеру. На рис. 5 показан один из возможных вариантов взаимного расположения вращающихся зеркал камеры в исходном и конечном положениях.

Во избежание повторных накладок изображений на пленке затворное зеркало во время съемки, помимо вращения, перемещается поступательно вдоль своей оси и за один цикл съемки один раз пересекает поле зрения объектива 4, чем и обеспечивает однократную экспозицию. Зеркало затвора может вращаться на полтора-два порядка медленнее, чем вращаются зеркала камеры, а поступательное его перемещение может совершаться также с весьма умеренной скоростью, достаточной для прохождения полной длины зеркала за период одного его оборота.

В настоящее время закончен полный расчет оптики камеры по данной схеме. Расчет выполнен Л. И. Коршуновой под руководством Д. Ю. Гальперна. Производится разработка конструкции камеры. Опытный образец прибора будет построен в 1959 г.

Основные данные проектируемой камеры

Фокусное расстояние	41 мм
Относительное отверстие	1 : 10,7
Зрачок входа (квадрат)	10×10 мм
Поле зрения (по диагонали кадра)	8°10'
Съемка производится на 8-миллиметровую кинопленку на формат кадра	3,6×4,8 мм
Количество снимаемых кадров	416

Частота съемки (в кадрах в сек.)	Продолжительность съемки (в сек.)	Скорость вращения зеркал (в об./сек.)	Масштаб времени (при кинопроекции)
400000	0,00100	40	25000
1000000	0,00040	100	62500
2000000	0,00020	200	125000
3000000	0,00013	300	187500
5000000	0,00008	500	312500
10000000	0,00004	1000	625000

Камера позволит получить фильмы, непосредственно пригодные для кинопроекции.

Из таблицы следует, что для получения частоты съемки 10 млн кадров в секунду потребуется вращение зеркал с частотой $60\,000\text{ мин.}^{-1}$, что не является большой скоростью и далеко не достигает предела, доступного для современных шарикоподшипников.

В качестве источников света для малых скоростей съемки могут быть использованы угольная дуга, лампа СВДШ, питаемая постоянным током, и лампа-вспышка, а для средних и больших скоростей съемки — импульсная лампа и высоковольтный разряд между металлическими электродами через узкое отверстие в изоляторе (см. статью Н. Н. Огурцовой и Н. В. Подмошенского в настоящем сборнике). Включение трех последних источников производится от камеры.

Выводы

Разработан метод повышения угловой скорости радиального вращения луча света относительно угловой скорости самих вращающихся элементов с помощью оптического ускоряющего устройства, которое может быть осуществлено в нескольких вариантах. Эти ускорители состоят из множества повторяющихся оптических элементов (призм или плоских зеркал), расположенных друг за другом и вращающихся поочередно навстречу один другому так, что каждый последующий из этих элементов добавляет к вращению луча удвоенную собственную скорость вращения.

Изготовлен и испытан макет оптики камеры. Результаты испытания показали, что идея, заложенная в оптическом ускорителе, является перспективной основой для разработки новой сверхскоростной кинокамеры для многомиллионных частот съемки. Такая камера позволит производить киносъемку без рассеивания изображения, при скоростях вращающихся механических частей, далеких от тех, которые вызывают разрушающие напряжения, а следовательно, можно будет использовать обычные серийно изготавливаемые шарикоподшипники. Предельные скорости вращения будут достигнуты при затрате меньших мощностей, без применения вакуума, без использования гелиевых турбинок и других технических средств.

На базе автоколлимационного ускоряющего устройства разработана и рассчитана новая оригинальная схема сверхскоростной многообъективной камеры с одним общим зрачком входа. В 1959 г. будет построен опытный образец такой камеры.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. Врихнер. *Physics today*, 7, № 8, 8, 1954.
- [2] M. Sultanoff, *J. Soc. Mot. Pict. Engrs.*, 55, 158, 1950.
- [3] В. O'Brien and G. Milne, *J. Soc. Mot. Pict. Engrs.*, 52, № 1, 30, 1949.
- [4] Л. А. Самуров, *Оптико-механическая промышленность*, № 2, 1956.

В. Б. ЛИКОРЕНКО

СВЕРХСКОРОСТНАЯ ФОТОРЕГИСТРИРУЮЩАЯ
УСТАНОВКА СФР

Сверхскоростная фоторегистрирующая установка СФР, серийно выпускаемая нашей промышленностью, предназначена для регистрации быстропротекающих самосветящихся и несамосветящихся процессов (взрыв, быстрое горение, электрический разряд, распространение ударных волн и др.).

Установка СФР может применяться в лабораторных и полевых условиях для различных исследований в обычном и поляризованном свете, как самостоятельно, так и в сочетании с другими устройствами (например, теневой установкой).

Установка состоит из съемочной камеры со сменной оптикой и пульта управления, связанного с камерой и сетью питания 220 в, 50 гц. Съемочная камера выполнена таким образом, что при перестановке отдельных легкоосменных узлов она может использоваться либо как фоторегистратор (фотохронограф), дающий непрерывную развертку исследуемого процесса с разрешением во времени до 10^{-8} сек. (при скорости развертки изображения на пленке до 3 750 м/сек.), либо как люца времени, дающая ряд последовательных фотографий изучаемого процесса, с частотой съемки до $2,5 \cdot 10^6$ сек. (при частоте вращения зеркала 75 000 мин.). В обоих случаях фотографирование производится на неподвижной фотопленке с помощью вращающегося зеркала.

Установка СФР снабжена синхронизирующим устройством, позволяющим предварительно инициировать исследуемое явление импульсом высокого напряжения в такой момент, при котором впоследствии обеспечивается регистрация изучаемой стадии процесса.

Возможна спаренная работа двух установок. При этом инициирование явления происходит в момент, определяющий съемку заданных стадий процесса каждой из камер. Спаренная работа может применяться для фотографирования процесса с двух направлений (в частности, стереофотографирования), съемки процесса с разными скоростями регистрации или фотографирования двух стадий одного процесса. Кроме того, может быть осуществлено инициирование исследуемого явления в момент, соответствующий совпадению заданного положения зеркала камеры с каким-либо другим явлением (например, подсветкой).

Установка позволяет регулировать и определять величину скорости регистрации с точностью, превышающей 0,1%.

Принципиальная схема работы камеры в варианте фоторегистратора представлена на рис. 1. Входной объектив 1 строит изображение исследуемого процесса в плоскости вертикальной, регулируемой по ширине щели 2, которая вырезает из этого изображения узкую полоску. Объек-

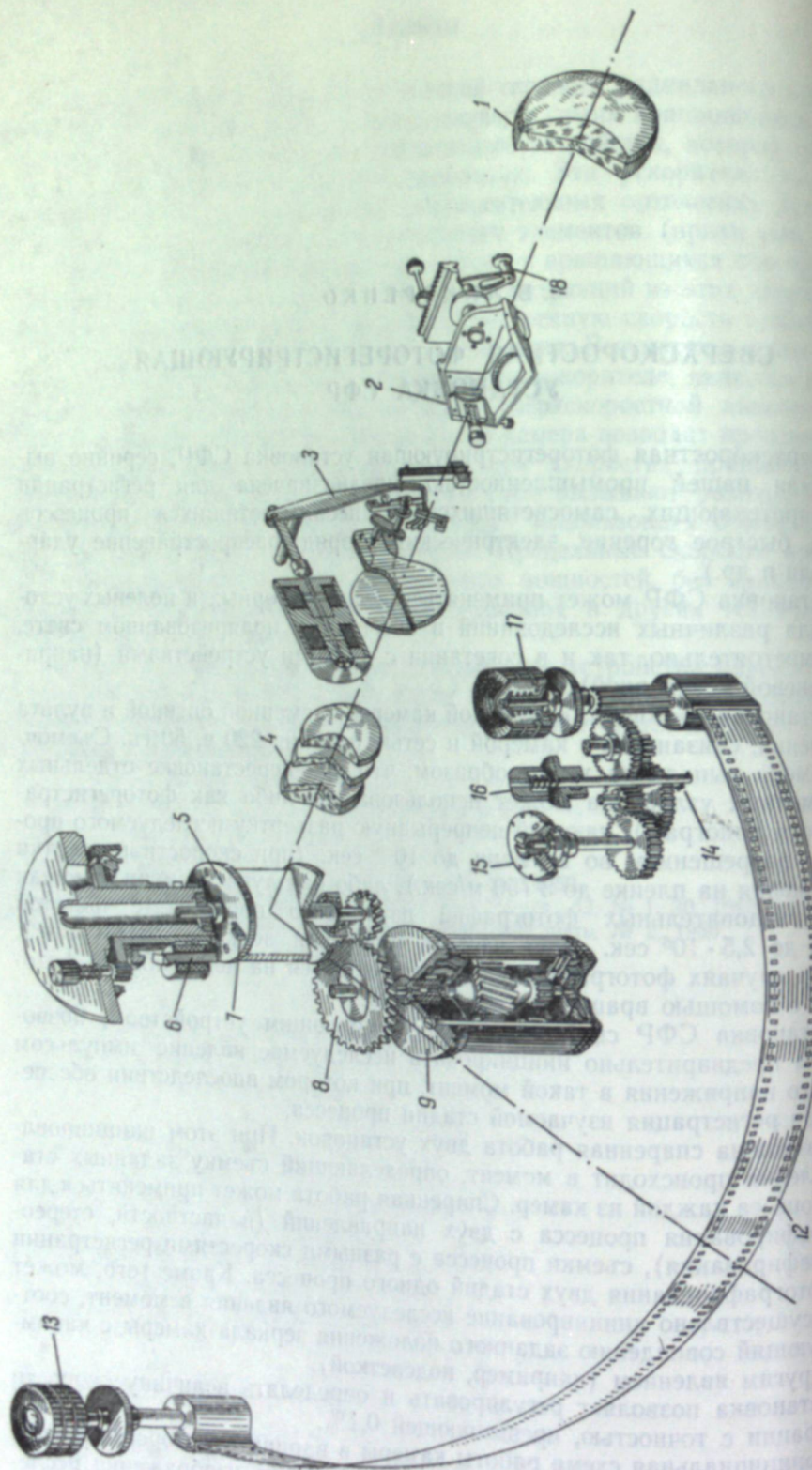


Рис. 1. Схема прибора СФР в варианте фоторегистратора.

тив 4 ($f=75$ мм, 1:2) с помощью вращающегося зеркала 5 строит изображение этой полоски на фокальной поверхности, где располагается фотопленка 12. При вращении зеркала световая полоска, вырезанная из изображения процесса, перемещается вдоль фокальной поверхности, экспонируя при этом пленку. Таким образом, осуществляется регистрация развития явления во времени.

Геометрическим местом изображения точки при развертке изображения зеркалом, ось вращения которого не совпадает в СФР с отражающей плоскостью зеркала, является улитка Паскаля. Вследствие технологических трудностей эта кривая аппроксимирована окружностью с центром, не совпадающим с центром вращения зеркала. При этом при равномерном вращении зеркала скорость движения изображения по пленке будет изменяться по закону:

$$V = 2\omega r \left(1 + \frac{a}{r} \cos \varphi\right),$$

где V — линейная скорость движения изображения,

ω — угловая скорость вращения зеркала,

a — расстояние от оси вращения зеркала до отражающей плоскости ($a=5$ мм),

r — радиус развертки ($r=239$ мм),

φ — угол поворота зеркала относительно оптической оси прибора.

Неравномерность скорости развертки на рабочем угле камеры СФР достигает $\pm 0,5\%$ и может быть легко учтена по вышеприведенной формуле.

Вращение зеркала 5 осуществляется специальным двухполюсным коллекторным электродвигателем 9 с широким диапазоном изменения оборотов через мультипликатор 8, состоящий из пары косозубчатых эвольвентных шестерен.

Электродвигатель обеспечивает изменение частоты вращения зеркала от 3 000 мин.⁻¹ до 75 000 мин.⁻¹, что соответствует скоростям развертки от 150 м/сек. до 3 750 м/сек.

При больших скоростях вращения зеркала центробежная циркуляция воздуха достигает весьма значительного объема, что приводит, помимо бесполезного расходования мощности привода, к ухудшению качества изображения, вследствие неодинаковой плотности разбрасываемого воздуха в различных участках светового пучка. Для уменьшения циркуляции воздуха на торцах зеркала установлены специальные диски, ограничивающие осевой подсос воздуха.

На верхнем ограничивающем диске закреплена пластина 7 из мягкого железа, замыкающая при определенном положении зеркала, магнитную цепь датчика 6, состоящего из катушки с сердечником и двух постоянных магнитов. При этом в катушке датчика индуцируется ЭДС в виде кратковременного импульса. Таким образом, число оборотов зеркала определяет число импульсов датчика в единицу времени, что используется для измерения скорости развертки.

Датчик 6 может быть повернут вокруг оси зеркала и установлен в любом положении. Благодаря этому можно получить любой сдвиг во времени (в пределах времени одного оборота зеркала) между моментом подачи импульса для инициирования исследуемого явления и моментом прохождения зеркалом положения, при котором отраженный луч попадает на начало кадра. Отсчет этого сдвига, в угловой мере, производится по специальной шкале.

Между щелью 2 и объективом 4 размещается механический быстродействующий электромагнитный двухлепестковый затвор 3, ограничиваю-

щий время поступления световой энергии на фотопленку. Затвор автоматически открывается на заданные промежутки времени, непосредственно перед инициированием явления. Кроме того, затвор может быть открыт на все время нажатия на пусковую кнопку пульта или длительно открыт (до 30 мин.) при соответствующей перестановке переключателя пульта.

Выдержка при съемке фоторегистратором определяется шириной щели 2, изменяемой от 0,01 до 0,5 мм, и скоростью вращения зеркала камеры. При изменении числа оборотов зеркала от 3 000 до 75 000 мин.⁻¹ величина выдержки может меняться от 10^{-5} до $8 \cdot 10^{-9}$ сек.

Величина экспозиции при регистрации явления регулируется шириной щели 2, величиной диафрагмирования объектива 4 (объектив снабжен ирисовой диафрагмой, позволяющей изменять его относительное отверстие до 1:32) и съемным нейтральным светофильтром, надеваемым на объектив 4.

Вместо регулируемой щели 2 за объективом 1 могут устанавливаться специальные сменные сетки с различной шириной прозрачного просвета, используемое для наводки на резкость. Установка производится при повороте рукоятки 18.

Фотопленка помещается в светонепроницаемых пеналах, позволяющих производить зарядку и разрядку камеры на свету.

Перематка фотопленки осуществляется при вращении рукоятки 17. Экспонированная пленка может перематываться обратно в пенале вращением рукоятки 13.

Отмеривание длины пленки на съемку одного кадра осуществляется с помощью шестеренчатого механизма, стопорящегося после перематки каждого кадра упором 14, который перед перематкой следующего кадра отводится при нажатии на кнопку 16. Количество перемотанных кадров фиксируется счетчиком 15.

Выравнивание пленки с целью получения резкого изображения по всему формату кадра производится путем принудительного изгиба краев пленки, вызывающего плотный ее прижим к цилиндрической поверхности столика, аппроксимирующей фокальную поверхность установки.

Для ориентации фокальной поверхности камера имеет два взаимноперпендикулярных цилиндрических уровня, по которым производится ее установка перед съемкой. Для изменения масштаба съемки установка снабжена тремя сменными входными объективами 1: объективом И-51 с $f=210$ мм, 1:4,5; специальным объективом с $f=750$ мм, 1:5; специальным объективом с $f=2\,000$ мм, 1:8.

Все входные объективы имеют подвижку для наводки на дальность до объекта и шкалы дальности до объекта, оцифрованные в метрах. Объективы с фокусным расстоянием 750 и 2 000 мм для защиты от внешних механических воздействий заключены в прочные металлические трубы, закрытые с торца специальными защитными стеклами.

Фотографическая разрешающая способность камеры с любым входным объективом не ниже 16 лин./мм.

Принципиальная схема работы камеры в варианте лупы времени представлена на рис. 2. Изображение объекта при помощи входного объектива 1 и объектива 4 (И-23 с $f=110$ мм, 1:4,5) строится в плоскости, пересеканной зеркалом 5. Установленные по дуге окружности линзы прямоугольной формы 11 переносят отраженное зеркалом изображение объекта на поверхность фотопленки 12.

Перед объективом 4 помещается ступенчатая диафрагма 2, имеющая ряд прямоугольных окон, взаимосмещенных по горизонтали и вертикали. Перед линзами 11 установлена диафрагма 10, представляющая

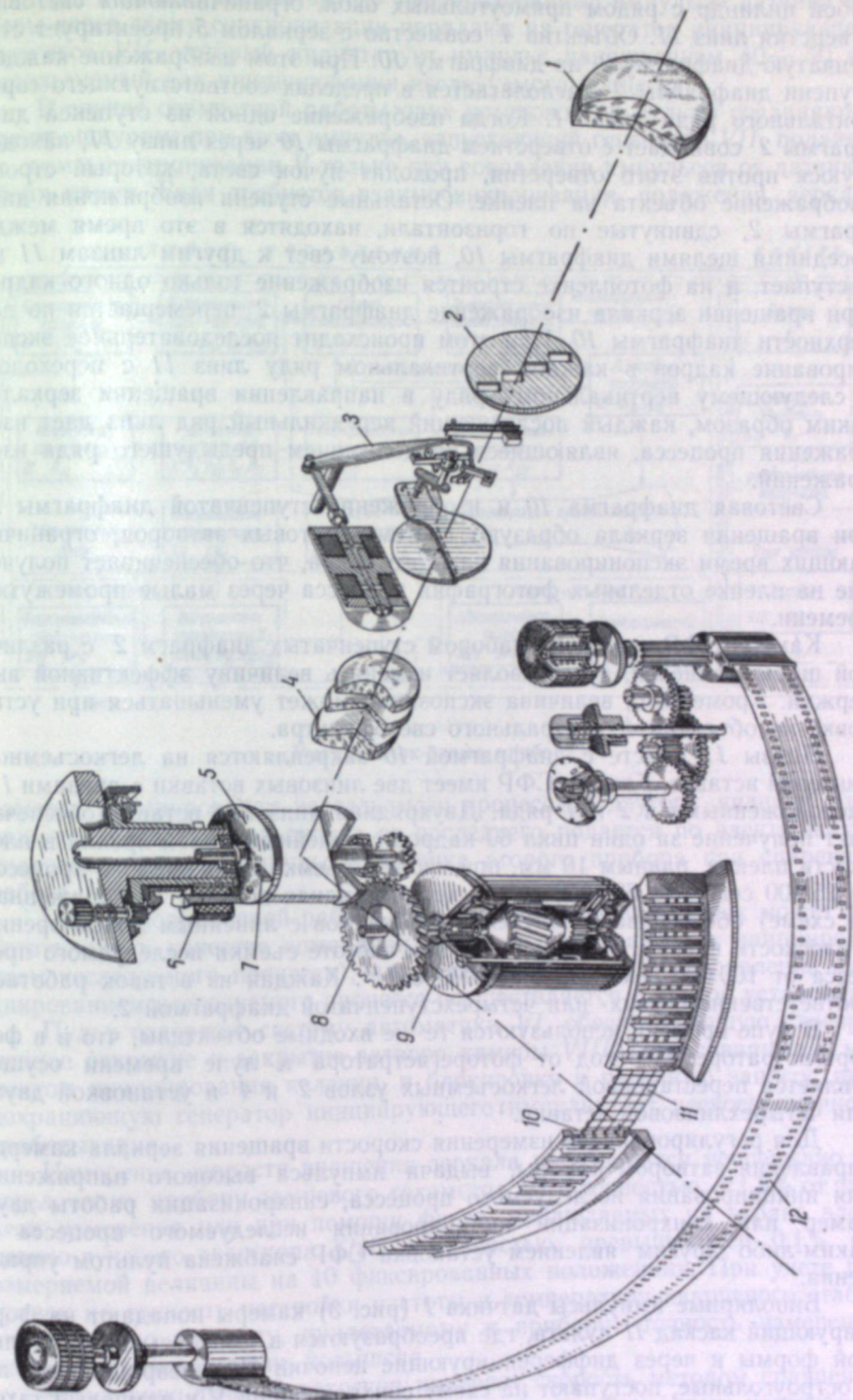


Рис. 2. Схема прибора СФР в варианте лупы времени.

собой цилиндр с рядом прямоугольных окон, ограничивающих световые отверстия линз 11. Объектив 4 совместно с зеркалом 5 проектирует ступенчатую диафрагму 2 на диафрагму 10. При этом изображение каждой ступени диафрагмы 2 располагается в пределах соответствующего горизонтального ряда линз 11. Когда изображение одной из ступеней диафрагмы 2 совпадает с отверстием диафрагмы 10 через линзу 11, находящуюся против этого отверстия, проходит пучок света, который строит изображение объекта на пленке. Остальные ступени изображения диафрагмы 2, сдвинутые по горизонтали, находятся в это время между соседними щелями диафрагмы 10, поэтому свет к другим линзам 11 не поступает, и на фотопленке строится изображение только одного кадра. При вращении зеркала изображение диафрагмы 2 перемещается по поверхности диафрагмы 10. При этом происходит последовательное экспонирование кадров в каждом вертикальном ряду линз 11 с переходом к следующему вертикальному ряду в направлении вращения зеркала; таким образом, каждый последующий вертикальный ряд линз дает изображения процесса, являющиеся продолжением предыдущего ряда изображений.

Световая диафрагма 10 и изображение ступенчатой диафрагмы 2 при вращении зеркала образуют систему световых затворов, ограничивающих время экспонирования каждого кадра, что обеспечивает получение на пленке отдельных фотографий процесса через малые промежутки времени.

Камера СФР снабжена набором ступенчатых диафрагм 2 с различной шириной щелей, что позволяет изменять величину эффективной выдержки. Кроме того, величина экспозиции может уменьшаться при установке на объектив 4 нейтрального светофильтра.

Линзы 11 вместе с диафрагмой 10 закрепляются на легкоосъемной линзовой вставке. Камера СФР имеет две линзовые вставки с линзами 11, расположенными в 2 и 4 ряда. Двухрядная линзовая вставка обеспечивает получение за один цикл 60 кадров с линейным полем зрения в плоскости пленки, равным 10 мм, при частоте съемки исследуемого процесса от 25 000 сек.⁻¹ до 625 000 сек.⁻¹; четырехрядная вставка (изображенная на схеме) обеспечивает получение 240 кадров с линейным полем зрения в плоскости пленки, равным 5 мм, при частоте съемки исследуемого процесса от 100 000 сек.⁻¹ до 2 500 000 сек.⁻¹. Каждая из вставок работает соответственно с двух- или четырехступенчатой диафрагмой 2.

В лупе времени используются те же входные объективы, что и в фоторегистраторе. Переход от фоторегистратора к лупе времени осуществляется перестановкой легкоосъемных узлов 2 и 4 и установкой двух- или четырехлинзовой вставки.¹

Для регулирования и измерения скорости вращения зеркала камеры, управления затвором камеры, выдачи импульса высокого напряжения для инициирования исследуемого процесса, синхронизации работы двух камер или синхронизации инициирования исследуемого процесса с каким-либо другим явлением установка СФР снабжена пультом управления.

Биполярные импульсы датчика 1 (рис. 3) камеры попадают на формирующий каскад II пульта, где преобразуются в импульсы прямоугольной формы и через дифференцирующие цепочки IV, превращающие их в остроугольные, поступают на схему синхронизации V и ламповый тахометр III.

¹ При входном объективе с $f=210$ мм так же переставляется объектив 1.

При нажатии кнопки «пуск» преобразованные импульсы датчика камеры через схему синхронизации попадают на генератор инициирующего импульса VII, который индуцирует импульс напряжением 40–50 кв, используемый для инициирования исследуемого процесса.

В случае совместной работы двух установок их пульта соединяются электрошнуром; при этом импульс, запускающий генератор VII, подается со схемы синхронизации V только при совпадении импульсов от датчиков обеих камер. Если требуется взаимосинхронизация положения зеркала

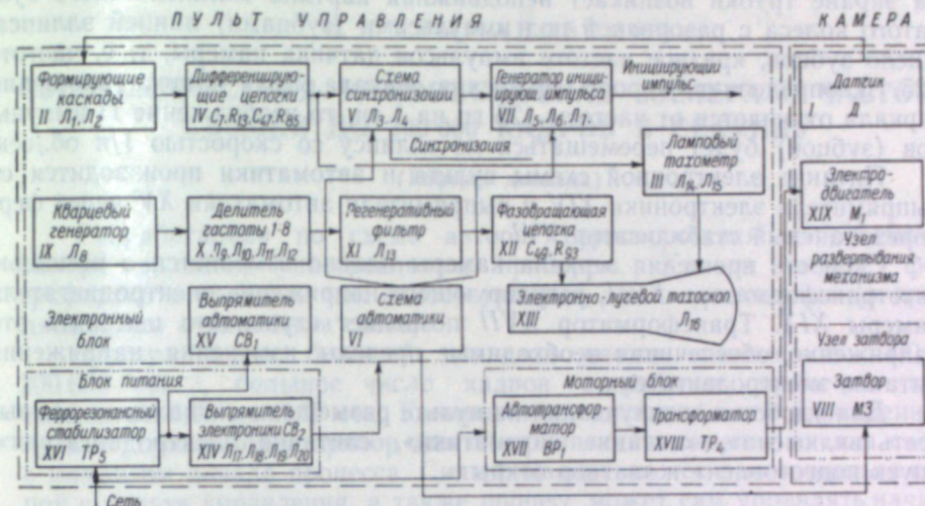


Рис. 3. Блок-схема прибора.

камеры, инициирования исследуемого процесса и другого явления (например, подсветки), то сигнал от последнего подается по электрошнур аналогично подаче импульсов датчика второго прибора при спаренной работе.

При одновременной работе двух установок любая из них может работать или в качестве командной (производит управление инициированием исследуемого процесса), или в качестве ведомой (управление инициированием исследуемого процесса осуществляется с другой установки).

Пульт содержит систему автоматики VI, обеспечивающую своевременное открытие и закрытие затвора камеры VIII, согласованные с моментом инициирования явления, и блокировку и релейную защиту, предохраняющую генератор инициирующего импульса от несвоевременного срабатывания.

Измерение скорости вращения зеркала производится непрерывно по стрелочному прибору лампового тахометра III с точностью $\pm 1,5\%$ от предела измерения или при помощи фигур, наблюдаемых на экране электронно-лучевого тахоскопа XIII, с точностью, превышающей 0,1% от измеряемой величины на 10 фиксированных положениях. При учете поправок на точность настройки частоты и температуру кварцевого стабилизатора (по паспорту, прилагаемому к прибору) точность измерения может быть значительно повышена.

Электронно-лучевой тахоскоп измеряет скорость методом сравнения частоты 125 гц с частотой импульсов от датчика. Эталонным источником частоты служит кварцевый генератор IX на частоту 1000 гц. Синусоидальное напряжение частотой 1000 гц от генератора IX преобразуется

в делителе частоты X в прямоугольные импульсы с частотой повторения 125 гц, а на выходе регенеративного фильтра XI превращается в синусоидальное напряжение частоты 125 гц. Пройдя фазовращающую цепочку XII , это напряжение подается на пластины электронно-лучевого тахоскопа и фиксируется на трубке в виде эллипса. Кроме того, на одну из пластин электронно-лучевого тахоскопа подаются преобразованные импульсы датчика, частота которых определяется только скоростью вращения зеркала камеры. Если частота этих импульсов кратна частоте 125 гц, на экране трубки возникает неподвижная картина эллиптического зубчатого колеса с разорванной под импульсами (зубцами) линией эллипса. Число зубцов, кратное частоте импульсов датчика камеры, т. е. частоте 125 гц, определяет скорость вращения зеркала. Если частота вращения зеркала отличается от частоты 125 гц на 1 гц, то изображение П-импульсов (зубцов) будет перемещаться по эллипсу со скоростью $1/n$ об./сек.

Питание электронной схемы пульта и автоматики производится от выпрямителя электроники XIV и выпрямителя автоматики XV через феррорезонансный стабилизатор XVI .

Скорость вращения зеркала камеры плавно изменяется с помощью автотрансформатора $XVII$, регулирующего напряжение электродвигателя камеры XIX . Трансформатор $XVII$ позволяет ступенчато изменять это напряжение, обеспечивая необходимые пределы изменения напряжения питания электродвигателя.

Для удобства эксплуатации на пульте размещены сигнальные лампы: «сеть включена», «питание автоматики», «питание электродвигателя», «пуск подготовлен» и «затвор открыт».

Габариты установки

1. Камера с объективом (фоторегистратор и лупа времени):

	Длина (в мм)	Ширина (в мм)	Высота (в мм)
Установка с входным объективом с $f=210$ мм	670*	415*	345
	560	390	
Установка с входным объективом с $f=750$ мм	1525	490	390
Установка с входным объективом с $f=2000$ мм	2850	490	560

* В числителе — данные для фоторегистратора, в знаменателе — для лупы времени.

2. Пульт управления: длина — 580 мм, ширина — 615 мм, высота — 1200 мм.

	Вес установки
Установка с входным объективом с $f=210$ мм	42 кг
Установка с входным объективом с $f=750$ мм	165 „
Установка с входным объективом с $f=2000$ мм	340 „
Пульт управления	150 „
Электрошнуры	20 „

И. И. КРЫЖАНОВСКИЙ

СВЕРХСКОРОСТНАЯ КИНОСЪЕМОЧНАЯ КАМЕРА С ЧАСТОТОЙ СЪЕМКИ ДО 200 000 КАДРОВ В СЕКУНДУ

(Реферат доклада)

Разработанная по схеме автора сверхскоростная киносъемочная камера является универсальным прибором. Камера может фотографировать процессы как самосветящиеся, так и освещенные (в проходящем или отраженном свете).

Камера имеет большой диапазон частот съемки от 1000 до 200 000 сек.⁻¹, большое число кадров с рабочим временем киносъемки от 0,02 до 0,45 сек. Камера имеет дистанционное управление от пульта управления и прибор для синхронизации момента начала съемки с моментом начала процесса. Синхронизация может производиться камерой с пульта управления, а также процесс может сам управлять началом съемки. (Следует отметить, что ни одна из существующих сверхскоростных киносъемочных камер не имеет управления со стороны процесса).

Камера может фотографировать объекты, расположенные на расстоянии от 0,8 м и далее, для чего имеются три сменных объектива с фокусным расстоянием 73, 150 и 300 мм.

Основные характеристические данные камеры

Кинематическая скорость	Рабочее время съемки (сек.)	Частота съемки (кадров в сек.)	Размер кадра (мм)	Разрешающая способность (линий на мм)	Число рабочих кадров
I	0,45	1000	15×22	20	430
		2000	7,6×22	20	850
		3600	7,6×12	20	1500
		6000	7,6×6	18	2500
II	0,06	6000	15×22	20	400
		12000	7,6×22	20	800
		21000	7,6×12	20	1400
		36000	7,6×6	18	2500
III	0,08	11000	15×22	20	350
		22000	7,6×22	20	700
		40000	7,6×12,5	20	1400
		66000	7,6×6	18	2400
IV	0,02	130000	3,6×6	17	4800
		17000	15×22	20	330
		33000	7,6×22	20	650
		60000	7,6×12	20	1300
		100000	7,6×6	18	2250
		200000	3,6×6	17	4500

Камера установлена на треноге, которая обеспечивает поворот на 360° и наклон оси объектива на $\pm 10^\circ$ в вертикальной плоскости.

В комплект камеры входит пульт управления, прибор для синхронизации, печатающий аппарат и комплект проявочных приспособлений.

Зарядка пленки в камеру производится на свету. Съемка производится на аэрофотопленку шириной 190 мм. Кадры располагаются на пленке в виде строк текста книги. Для получения позитивного фильма производится перепечатывание кадров на 35-миллиметровую позитивную пленку при помощи печатающего аппарата.

Камера имеет четыре основные кинематические скорости. Каждая скорость обеспечивает несколько ступеней частоты съемки за счет смены комплектов призмных и объективных блоков.

С. В. РЫЛЛО

РАСШИРЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КИНОСЪЕМОЧНОГО АППАРАТА СКС-1

Выпускаемый отечественной промышленностью скоростной кино-съемочный аппарат СКС-1 является наиболее распространенным благодаря своей портативности, надежному и безотказному устройству, простоте в обращении и довольно широкому диапазону частот съемки от 150 до 4 000 сек.⁻¹ с сохранением стандартного формата кадра на 16-миллиметровой пленке.

Заводом была выпущена модель аппарата для съемки с частотой 8 000 сек.⁻¹ за счет деления кадра. Формат кадра в этой модели равен $4,8 \times 3,6$ мм. Таким образом, полезная площадь кадра уменьшается более чем в 4 раза.

Однако широкого применения указанная конструкция не получила в основном из-за низкой разрешающей способности системы (объектив, призма, пленка) и отсутствия специальной проекционной аппаратуры. Кроме того, уменьшение площади кадра влечет за собой уменьшение масштаба изображения и в значительной степени снижает точность измерений.

Наиболее эффективным способом повышения точности результатов измерения является увеличение частоты съемки при сохранении масштаба изображения. Для достижения более высокой частоты съемки в аппарате СКС-1 необходимо увеличение скорости протягивания пленки путем увеличения числа оборотов ведущего барабана, что достигается кратковременным увеличением напряжения на клеммах моторов. Такая возможность имеется в заграничных аппаратах аналогичной конструкции, например, в аппаратах «Фастакс».

В МГУ, на кафедре научной фотографии и кинематографии, а также на механико-математическом факультете проводились съемки с повышением частоты за счет увеличения напряжения на клеммах моторов. Эксперименты проводились в целях определения максимально допустимого начального напряжения и увеличения напряжения после пуска в процессе съемки. В первом случае было установлено, что напряжение 160 в переменного тока является предельным; оно обеспечивает частоту съемки (с заметным обгоранием коллектора в момент пуска) $5\,200 \div 6\,000$ сек.⁻¹. Дальнейшее увеличение начального напряжения может привести к сгоранию обмотки мотора. Применение постоянного тока повышенного напряжения дает обгорание уже при 135 в и не обеспечивает получаемой при переменном токе частоты.

Во втором случае напряжение тока увеличивалось в процессе съемки. Включение двигателей аппарата происходило при начальном напряжении 130 в переменного тока с последующим приростом напряжения после пу-

ска до 220 в. Прирост напряжения осуществлялся с помощью автотрансформатора ЛАТР-1 путем поворота рукой регулировочной рукоятки автотрансформатора на 120° . Естественно, что такая «синхронизация» не могла обеспечить стабильности и полученные результаты давали значительные расхождения в частоте съемок в пределах $6\ 000 \div 7\ 700 \text{ сек.}^{-1}$.

Разработка простейшего редуктора, связывающего ось ведущего мотора с осью автотрансформатора, обеспечивает равномерное нарастание напряжения до заданной величины и выключение его в нужный момент. Схема редуктора и коммутирующего устройства (рис. 1) обеспечивает

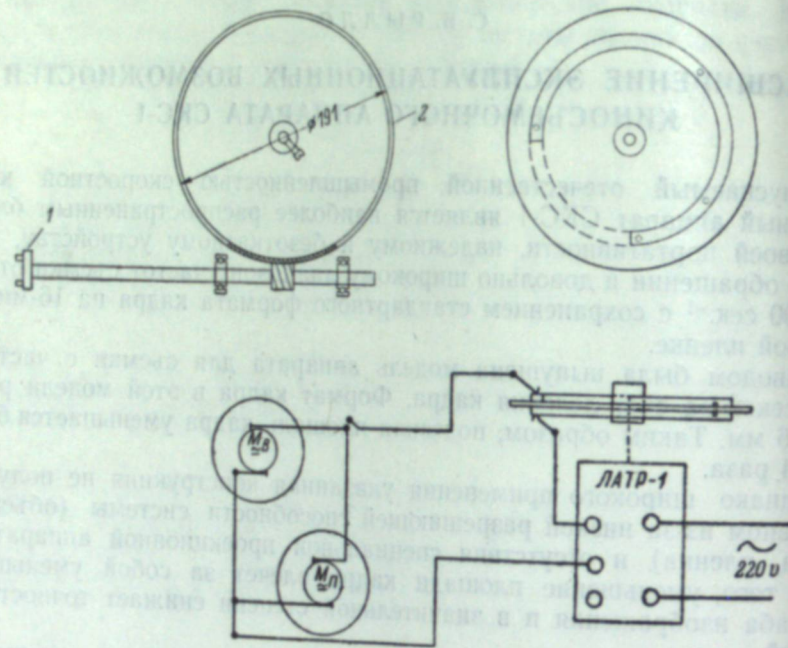


Рис. 1. Схема механического и электрического соединения скоростной камеры с автотрансформатором.
1 — муфта соединения с валом ведущего мотора; 2 — червячная шестерня, $Z = 600$, шаг равен 1 мм.

стабильность в работе аппарата и получение максимальных частот до $7\ 700 \text{ сек.}^{-1}$ на последних 4—5 м пленки.

Дальнейшее существенное увеличение частоты съемки за счет увеличения числа оборотов для данной конструкции аппарата не рационально, так как будет приводить к обрывам пленки и возможным поломкам отдельных узлов.

Полученная частота съемки $7\ 100 \div 7\ 700 \text{ сек.}^{-1}$ все же не обеспечила требуемой точности измерения. Для дальнейшего увеличения частоты съемки и сокращения времени выдержки мы воспользовались делением кинокадра по горизонтали с помощью 8-гранной призмы и специальной диафрагмы, сохраняющей полностью ширину 16-миллиметрового кадра. Для этого в стандартном аппарате СКС-1 были произведены следующие изменения.

1. Четырехгранная компенсационная призма с осью была заменена 8-гранной призмой, выпускаемой заводом под сборочным № 1-39 совместно с осью, на которой она укреплена.
2. Размер окон коробчатой диафрагмы, ограничивающей световой пучок, идущий от объектива на призму и от призмы на пленку был соот-

ветственно изменен. Размеры окон диафрагмы и оправы призмы указаны на рис. 2. Линейное перемещение объекта съемки в горизонтальном направлении позволило вести съемку без специальных оптических приспособлений.

Полученное изображение по своим масштабам полностью соответствовало изображению, полученному на 16-миллиметровом кадре со сре-

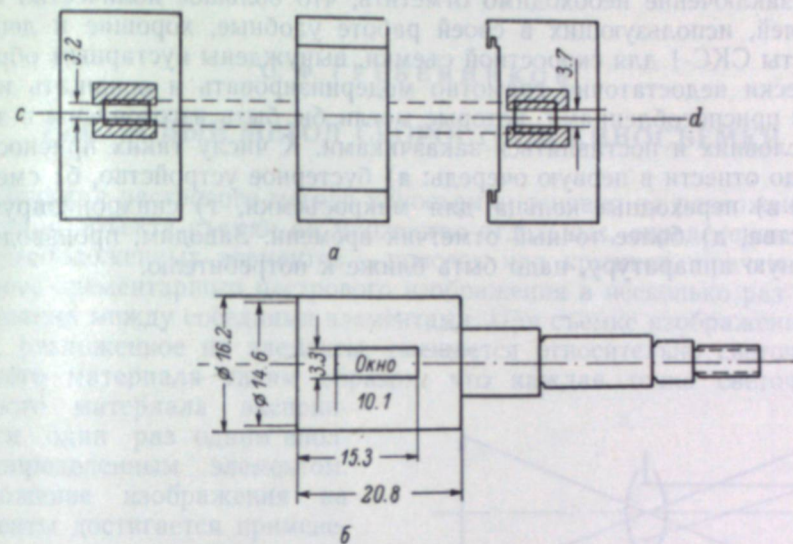


Рис. 2. Детали, изменяемые в камере СКС-1.
а) Диафрагма (дет. 1-141). б) Ось призмы (дет. 1-139). Пластины из фольги толщиной 0,5 мм напаяются симметрично оси. В барабане призмы делается 8 окон.

занием части ненужного фона в верхней и нижней частях кадра. Сдвиг изображения перемещающегося объекта в кадре уменьшился как за счет увеличения частоты съемки, так и за счет сокращения размера окна компенсационной призмы, что дало время абсолютной выдержки, равное $1/5$

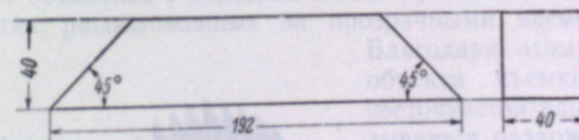


Рис. 3. Призма Дове.

от частоты, вместо $1/3,7$ в стандартном аппарате. В результате была достигнута частота $14\ 000\text{—}15\ 000 \text{ сек.}^{-1}$.

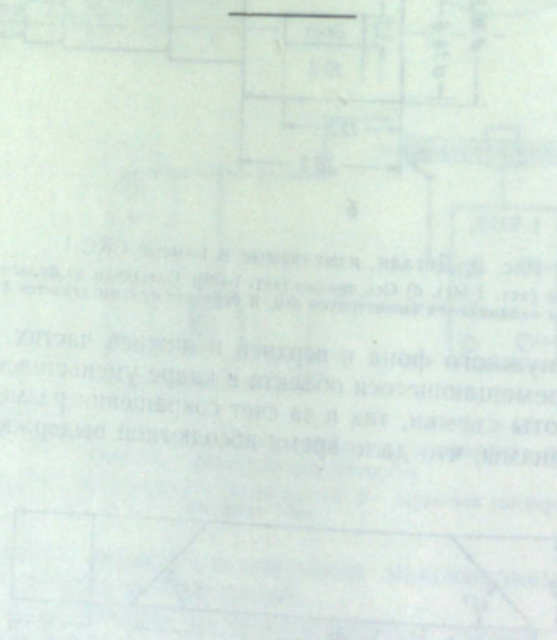
Эти мероприятия увеличили точность измерения и позволили получить весьма ценный материал для исследователей.

Поскольку в экспериментальных работах приходится иметь дело с объектами, перемещающимися в различных направлениях, для использования максимального масштаба приходится совмещать горизонталь кадра с направлением движения объекта, для чего необходимо придавать значительные наклоны аппарату относительно горизонтали.

В случае предложенного нами способа деления кадра по горизонтали это имеет весьма важное значение, так как соотношение сторон кадра становится уже не $3 : 4$, а $1,5 : 4$.

Наклоны аппарата СКС-1, как подсказывает опыт эксплуатации, допустимы в весьма ограниченных пределах и ведут к ухудшению динамических свойств, а подчас к образованию «салатов» и поломкам механизмов. Применение оборачивающей призмы (рис. 3), расположенной перед объективом в специальной оправе, позволяет производить съемку, не нарушая нормального положения аппарата.

В заключение необходимо отметить, что большое количество исследователей, использующих в своей работе удобные, хорошие и дешевые аппараты СКС-1 для скоростной съемки, вынуждены кустарным образом, технически недостаточно грамотно модернизировать и оснащать их нужными приспособлениями, которые могли бы быть изготовлены в заводских условиях и поставлены заказчиками. К числу таких приспособлений надо отнести в первую очередь: а) бустерное устройство, б) сменную оптику, в) переходные кольца для макросъемки, г) синхронизирующие устройства, д) более точный отметчик времени. Заводам, производящим съемочную аппаратуру, надо быть ближе к потребителю.



О. Ф. ГРЕБЕННИКОВ

РАСТРОВЫЙ МЕТОД СКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ

Принцип растрового метода киносъемки основан на разложении изображения объекта съемки на множество отдельных, определенным образом расположенных элементов — полосок или кружков, причем размер каждого элементарного растрового изображения в несколько раз меньше расстояния между соседними элементами. При съемке изображение предметного материала таким образом, смещается относительно светочувствительного материала экспонируется один раз одним вполне определенным элементом. Разложение изображения на элементы достигается применением различных растров — линейных или точечных, светопоглощающих или линзовых.

На рис. 1 показано разложение оптического изображения на элементы линейным светопоглощающим растром 3, который представляет собой непрозрачную пластинку с параллельными щелями. Объектив 2 изображает объект съемки 1 в плоскости растра. Световой поток от объектива 2 попадает к светочувствительному материалу 4 только в местах, расположенных за прозрачными элементами растра.

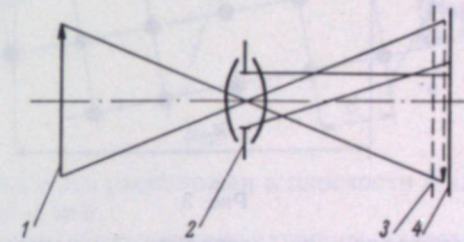


Рис. 1.

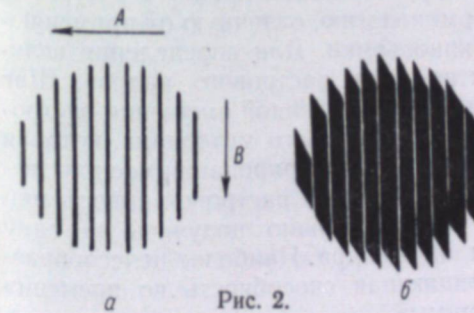


Рис. 2.

Благодаря этому изображение объекта съемки в плоскости светочувствительного слоя оказывается разложенным на полоски, разделенные темными участками. Положим, объект съемки имеет форму шара, тогда изображение шара в плоскости светочувствительного материала будет иметь вид, представленный на рис. 2, а. Если при съемке изображение шара будет перемещаться в направлении стрелки В, а светочувствительный материал — равномерно перемещаться в направлении стрелки А на величину шага растра, то светочувствительный материал будет экспонирован, как показано на рис. 2, б.

При равномерном освещении фотографически обработанного негатива через растр, аналогичный примененному при съемке, можно выде-

лить отдельные фазы движения шара, а при перемещении негатива относительно раstra можно получить воспроизведение движения шара, т. е. растровое киноизображение. Такое рассматривание или дешифрирование растрового изображения может производиться как на установке аналогичной съемочной камере, так и непосредственно на самой съемочной камере. Растровое киноизображение таким же способом может быть оптически перепечатано на обычную киноленту в виде серии кадров.

При разложении изображения на линейные элементы время съемки не должно превышать времени смещения светочувствительного материала на величину шага элементарных растровых изображений, иначе произойдет повторное экспонирование светочувствительного материала. Время съемки должно быть ограничено либо специальным затвором, либо кратковременным освещением снимаемого процесса; исключение составляет съемка кратковременных самосветящихся процессов.

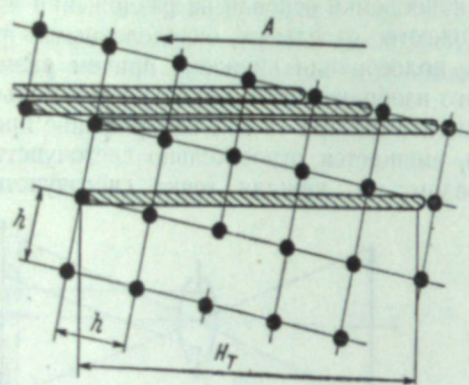


Рис. 3.

Для достижения большей величины смещения светочувствительного материала до начала повторного экспонирования, с целью увеличения времени съемки, можно применить разложение изображения на точечные элементы. На рис. 3 изображен в сильно увеличенном виде участок растрового изображения с разложением на точечные элементы. При перемещении светочувствительного материала по стрелке A каждое элементарное растровое изображение экспонирует полосу светочувствительного материала длиной H_m . Из рисунка видно, что длина этой полосы, т. е. величина смещения светочувствительного материала до начала повторного экспонирования, может превышать шаг растровых элементов в несколько раз. Растровый метод кино съемки имеет принципиальное отличие от обычных методов кино съемки в том, что снятое изображение не разделено на отдельные фазы — кадры. Поэтому для характеристики процесса растровой кино съемки полезно ввести особую терминологию, отличную от применяющейся для характеристики обычной кино съемки. Для определения величины шага кадра можно ввести понятие «шаг растрового кадра». Шаг растрового кадра определяется минимальной величиной смещения растрового изображения относительно светочувствительного материала, которая позволяет при съемке зафиксировать, а при дешифрировании воспроизвести изменение объекта съемки во времени. Частота растровой кино съемки и максимальное количество кадров, которое можно получить за одну съемку, являются функцией величины шага кадра. Наиболее целесообразно их назвать соответственно «разрешающая способность во времени» и «оптическая емкость растровой системы».

Киноизображение, полученное при переводе непрерывного растрового изображения в дискретное, состоящее из отдельных кадров можно охарактеризовать «коэффициентом кадрирования». Последний представляет собой отношение количества кадров, полученных в результате печати на киноленте, к величине оптической емкости растрового киноизображения. Сравнительная простота конструкции растровых камер и возможность получения чрезвычайно больших величин разрешающей способности во

времени при кино съемке вызывают значительный интерес к этому методу.

В 1954 г. была начата работа по исследованию растрового метода кино съемки. Задача этой работы заключалась в изучении следующих вопросов:

1. Определение рациональных путей построения растровых камер.
2. Изучение основных характеристик растровой кино съемки.
3. Проведение сравнительного анализа растрового метода с другими методами скоростной кино съемки с целью определения области использования растровых камер.

В результате исследования рациональных путей построения растровых камер нам удалось прийти к выводу, что наиболее целесообразно разложение изображения объекта съемки производить линзовым точечным

растром, который представляет собой стеклянную пластинку с расположенным на ней множеством сферических линз. Схема разложения изображения линзовым растром изображена на рис. 4. Съемочный объектив 2 изображает объект съемки 1 в плоскости раstra 3. Каждая линза раstra изображает выходной зрачок объектива 2 в плоскости 4, образуя элементарные растровые изображения.

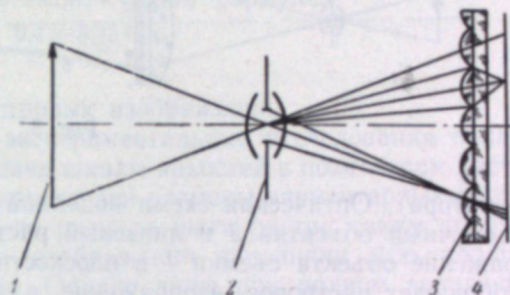


Рис. 4.

Светочувствительный материал может быть расположен в плоскости 4 или в плоскости, оптически сопряженной с ней.

Применение линзового точечного раstra позволяет улучшить качество изображения, увеличить оптическую емкость системы и получить большую светосилу камер по сравнению с разложением при помощи линейных и светопоглощающих растров. При применении линзовых растров светосила камеры определяется в основном относительным отверстием линз раstra и не зависит от величины выходного апертурного угла съемочного объектива. Последнее делает наиболее целесообразным применение линзовых растров в тех случаях, когда выходная апертура съемочного объектива не может быть велика, например, при микрокино съемках, при применении электрооптических затворов, которые обычно ограничивают размер действующей диафрагмы, и в тех случаях, когда необходима большая глубина резкости. В настоящее время технология изготовления линзовых растров полностью разработана. Исследования этих растров показали, что они вполне пригодны для скоростной кино съемки и могут быть с успехом использованы в растровых камерах.

Вторым важным вопросом при построении растровых камер является выбор способа смещения растрового изображения относительно светочувствительного материала. Из всех известных способов смещения растрового изображения наибольший интерес представляет смещение изображения при помощи вращательного движения раstra или светочувствительного материала, изготовленных в виде диска. При таком способе смещения отпадает необходимость в применении сложных систем синхронизации и может быть достигнута сравнительно большая величина разрешающей способности во времени.

Однако для создания подобных растровых камер необходимо применение растров с расположением линзовых элементов по спиралам Архи-

меда. Изготовление таких растров представляет некоторые технологические затруднения, но принципиально возможно.

При применении растров с расположением линз параллельными рядами наиболее рационально применять поступательное перемещение растров или светочувствительного материала в камерах, предназначенных для съемок с разрешающей способностью во времени до нескольких сотен тысяч кадров в секунду. Для достижения больших величин разрешающей способности во времени целесообразно смещение растрового изображения производить при помощи системы вращающихся зеркал (оптического

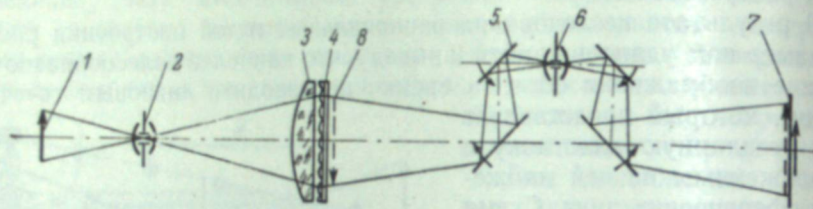


Рис. 5.

редуктора). Оптическая схема подобной камеры изображена на рис. 5. Съёмочный объектив 2 и линзовый растр 4 формируют растровое изображение объекта съемки 1 в плоскости 8, промежуточный объектив 6 изображает растровое изображение в плоскости светочувствительного материала 7. Смещение изображения производится системой зеркал 5, которые вращаются в направлениях, указанных на рисунке стрелками. Линза 3 выполняет функции коллектива.

Следует отметить, что при смещении изображения системой вращающихся зеркал необходимо применение промежуточного объектива, что ухудшает такие характеристики растровых камер, как величина оптической емкости и светосила системы. Поэтому применение систем вращающихся зеркал можно рекомендовать только в камерах, предназначенных для съемок с чрезвычайно большими величинами разрешающей способности во времени.

Во втором разделе работы были исследованы основные характеристики растровой киносъемки. Для исследования основных характеристик был изготовлен действующий макет растровой камеры, в котором разложение изображения осуществлялось линзовым точечным растром, а съемка производилась на фотопластинку размером 9×12 см. Смещение растрового изображения достигалось поступательным перемещением фотопластинки.

Для определения таких важных характеристик растровой киносъемки, как разрешающая способность во времени и оптическая емкость системы, необходимо было в первую очередь найти расчетные зависимости для шага растрового кадра. Наиболее удобно шаг растрового кадра определить как функцию разрешающей способности системы «оптика — светочувствительный материал». В результате исследования большого количества различного типа фотопластинок и различных растров были выведены следующие эмпирические формулы для определения шага растрового кадра:

$$a = \frac{2}{3R} \quad \text{при } a_{\text{геом.}} < \frac{1}{2R}, \quad (1)$$

$$a = a_{\text{геом.}} + \frac{1}{6R} \quad \text{при } a_{\text{геом.}} > \frac{1}{2R}, \quad (2)$$

где a — шаг растрового кадра, R — разрешающая способность системы «линза растра—светочувствительный материал», $a_{\text{геом.}}$ — размер элементарных растровых изображений, рассчитанный по формулам параксиальной оптики. Первая формула справедлива при малых размерах элементарных растровых изображений, вторая при размерах элементарных растровых изображений больших величины $\frac{1}{2R}$.

На макете растровой камеры было также исследовано качество растрового изображения (разрешающая способность растрового изображения, коэффициент потери контрастности и искажения изображения).

Разрешающая способность растрового изображения характеризуется в основном структурой растра. При разложении изображения на точечные элементы разрешающая способность растрового изображения R_p может быть определена по следующей эмпирической формуле:

$$R_p = \frac{0,4 \div 0,45}{h}, \quad (3)$$

где h — шаг элементарных растровых изображений.

Как теоретические, так и экспериментальные исследования показывают, что для правильной передачи шкалы яркостей в позитивном растровом изображении необходимо при печати размеры элементарных растровых изображений увеличивать до размера шага растра таким образом, чтобы элементарные растровые изображения заполняли всю площадь светочувствительного материала. Однако даже при полном заполнении светочувствительного материала наблюдается некоторая потеря контрастности.

Соответствующие исследования показывают, что сам метод растровой киносъемки каких-либо искажений в изображении как движущихся, так и неподвижных объектов съемки не вносит. Однако значительные искажения растрового изображения могут быть вызваны деформацией растрового кинонегатива в процессе обработки либо в процессе хранения. Поэтому при растровой киносъемке можно рекомендовать применение светочувствительного материала только на недеформируемой основе, например на стеклянных пластинках.

С помощью макета растровой камеры были произведены несколько съемок быстропротекающих процессов с целью изучения образования растрового киноизображения. Разрешающая способность во времени достигала $120\,000 \text{ сек.}^{-1}$ при оптической емкости, равной 300 кадрам, и относительном отверстии системы $1/4,5$.

Каковы же технические возможности растрового метода скоростной киносъемки?

Основным преимуществом применения растрового метода для скоростной киносъемки является чрезвычайно малая величина шага растрового кадра, которая позволяет даже при сравнительно небольших скоростях смещения растрового изображения относительно светочувствительного материала получать очень большие разрешающие способности во времени, которые могут достигать десятков и даже сотен миллионов кадров в секунду.

Величина оптической емкости растровых систем определяется в основном шагом элементарных растровых изображений. От шага элементарных растровых изображений зависит также разрешающая способность растрового изображения, причем с увеличением шага элементарных растровых изображений увеличивается оптическая емкость, но ухудшается качество изображения. Рекомендовать какой-то определенный размер

шага растровых элементов затруднительно, поскольку для одних целей требуется большая величина оптической емкости, для других — лучшее качество изображения. Однако, как показывает опыт, в большинстве случаев для исследования быстропротекающих процессов достаточно получить 2—3 сотни кадров. Это можно осуществить применением шага элементарных растровых изображений порядка $0,3 \div 0,5$ мм. При таком шаге растра получается сравнительно малая величина разрешающей способности растрового изображения порядка $1 \div 2$ лин./мм. Но растровый метод кино съемки позволяет увеличивать размер кадра в значительных пределах, причем в противоположность другим методам кино съемки увеличение размера кадра не влечет за собой увеличения шага кадра, а следовательно, и уменьшения частоты кино съемки.

Увеличением же размера кадра можно увеличить количество деталей, зафиксированных на каждом снятом кадре.

Последнее иллюстрируется приводимой таблицей.

Растровое изображение		Стандартный кинокадр	
Размер кадра	Количество линий на ширине кадра при $k = 0,3$ мм	Форма киноленты	Количество линий на ширине кадра при $R = 30$ лин./мм
90×120	180 линий	8 мм	150 линий
130×180	270 линий	16 мм	300 линий
300×400	600 линий	35 мм	660 линий

Здесь дано количество линий, которое можно получить на ширине растрового кадра при различных размерах кадра и шаге элементарных растровых изображений в 0,3 мм, приведено количество линий, которое можно получить при обычной кино съемке на различном формате киноленты при разрешающей способности в 30 лин./мм. Из сопоставления этих данных следует, что при размере растрового кадра 90×120 мм качество растрового изображения несколько лучше того, которое получается при съемке на 8-миллиметровый кинокадр. При увеличении размера кадра до 130×180 мм качество изображения примерно соответствует 16-миллиметровому кинокадру. И, наконец, при размере кадра 300×400 мм можно получить изображение, соответствующее стандартному 35-миллиметровому кинокадру.

Следовательно, при растровой кино съемке возможно получить несколько сотен кадров, качество которых не будет отличаться от качества изображения, получаемого при обычной кино съемке, но частота кино съемки при этом может достигать нескольких миллионов кадров в секунду.

Какова же область использования растровой кинематографии?

Можно ли утверждать, что растровый метод в состоянии вытеснить другие оптико-механические методы кино съемки, применяемые для съемок с подобными частотами? Конечно нет! Растровый метод имеет целый ряд серьезных недостатков, которые отсутствуют в некоторых других оптико-механических методах. К этим недостаткам в первую очередь следует отнести:

- 1) ограниченную величину оптической емкости;
- 2) необходимость системы синхронизации (причем при применении вращающихся зеркал синхронизация может производиться только от камеры к объекту съемки);
- 3) необходимость снабжения растровых камер быстродействующими затворами для ограничения времени съемки. Допустимо считать, что

растровые камеры с поступательным движением растра или светочувствительного материала целесообразно применять в тех случаях, когда для съемок с частотой порядка нескольких сотен тысяч кадров в секунду требуется простая, дешевая и портативная аппаратура. Растровые камеры с системой вращающихся зеркал могут найти применение при необходимости получения частоты кино съемки, которую затруднительно достигнуть другими оптико-механическими методами.

В настоящее время под руководством С. М. Проворнова разрабатывается растровая установка для съемок с разрешающей способностью во времени до нескольких десятков миллионов кадров в секунду.

Л. В. АКИМАКИНА

ПУТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ
РАСТРОВЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ
СЪЕМКИ

(Реферат доклада)

Использование оптических растров для целей высокоскоростной съемки позволяет не только увеличить число снятых кадров в секунду, но и значительно улучшить фотографическое качество изображений.

В настоящее время в Советском Союзе линзовые растры используются для безочкового стереоскопического кино и растровой стереофотографии, а также находят применение в цветном телевидении, в полиграфической технике, в электронных приборах, в высокоскоростной съемке и т. д.

Оптическая растровая решетка представляет собой большое число оптических микроэлементов, расположенных в строгой последовательности на одной геометрической плоскости. Микроэлементом линзового растра может быть или цилиндрическая плоско-выпуклая линза (такой растр называется параллельным), или сферическая плоско-выпуклая линза (растр называется сотовым), или коническая плоско-выпуклая линза (растр называется перспективным). Расположение элементов в сотовом растре может быть осуществлено как по ортогональным, так и по гексагональным координатам. Очевидно, что в последнем случае коэффициент использования площади будет больше.

Технологический процесс изготовления линзовых растров должен обеспечивать получение оптических микроэлементов высокого качества в отношении их профиля, чистоты оптической поверхности, а также повторения этих микроэлементов в строго определенном порядке.

К настоящему времени практическое применение нашли 2 группы методов: механические и фотомеханические.

Из механических способов разрабатывается способ инженера Киселева, предусматривающий изготовление металлической матрицы обратного профиля и получение линзовых растров из пластмассы путем штамповки или залива на эту матрицу жидкого мономера с последующей его полимеризацией. Очевидно, что в этом методе наиболее трудоемким является процесс изготовления самой металлической матрицы. Обратный рельеф такой матрицы получается выдавливанием канавок профилированным роликом на поверхности зеркально полированной металлической пластины. Для обеспечения шага элементов растра в кинематическую схему прибора для изготовления матрицы должно быть включено высокоточное делительное устройство. При изготовлении металлических матриц в НИКФИ использовался компаратор ИЗА-2, осуществляющий перемерение ролика с большой точностью.

Этим способом уже изготовлены металлические матрицы и пластмассовые параллельные линзовые растры с шагом элементов в 0,75 и 0,5 мм при относительном отверстии 1:11.

Отличительной особенностью разбираемого метода является повторяемость параметров получаемых растров. К недостаткам следует отнести наличие групповых ошибок в шаге элементов и недостаточную чистоту оптической поверхности элементов. Следует подчеркнуть, что большинство механических способов может быть пригодно лишь для изготовления параллельных линзовых растров.

Наиболее эффективным с точки зрения обеспечения точностей по шагу элементов и качеству оптической поверхности, а также наиболее универсальным в отношении возможностей изготовления растров с различными элементами являются фотомеханические способы, руководителем разработки которых является С. П. Иванов.

Изготовление растров фотомеханическими способами осуществляется на стекле из светочувствительного коллоида. Коллоид, задубленный светом соответствующим образом и отмытый в воде, образует на стекле необходимый профиль элементов линзового растра. Для дубления коллоида, чувствительность которого очень мала, обычно используются ртутно-кварцевые лампы. Использование этих источников света определяется тем, что положение максимума чувствительности коллоида находится в области $450 \div 350$ мкм, в которой они излучают 80% энергии.

Основным инструментом, определяющим результирующие точности по шагу, является растр-негатив.

Обычно в качестве растра-негатива используются копии с полиграфических линейчатых растров, имеющих точность элементов по шагу около $3 \div 5$ мк. Так как полиграфические растры обычно имеют отношение прозрачных и непрозрачных элементов 1:1, а для растра-негатива это отношение должно быть увеличено, то в настоящее время разработаны способы, позволяющие весьма просто менять отношение элементов.

Контрастный метод С. П. Иванова обеспечивает изготовление линзовых растров самых различных структур. Например, для изготовления параллельного линзового растра печатается в контакте с растром-негативом, имеющим отношение элементов 1:5, пластина, покрытая светочувствительным коллоидом. После дубления светом и отмытки на стекле остаются только задубленные участки, образующие растр с отношением 5:1. Назовем такой растр заготовкой. Оставшийся слой чернится физическим усилением, пластина вторично поливается более толстым слоем светочувствительного коллоида и после сушки вновь экспонируется, на этот раз со стороны стекла.

После отмытки в воде и специальной сушки в местах непрозрачных элементов коллоид вымывается совсем, а в местах прозрачных элементов образуются цилиндрические линзы. Основными факторами, формирующими профиль линз за счет поверхностного натяжения, являются специально разработанный состав эмульсии и режимы проявления и сушки.

Изготовление параллельных растров контрастным методом опробовано, и получены растры с шагом элементов в $0,3 \div 0,7$ мм. Преимуществом таких растров является то, что места стыков линз оказываются перекрытыми непрозрачными элементами заготовки, и поэтому полностью исключается паразитная засветка, сильно снижающая контраст изображения.

Значительно сложнее технология изготовления растров из сферических элементов. В этом случае основная трудность заключается в изготовлении элементов.

лении точечного растра-негатива с гексагональным расположением элементов.

При изготовлении точечного растрового негатива гексагональной системы координат С. П. Ивановым применено сложение двух линейчатых растров под углом 60° . Такой растр обеспечивает расположение центров ромбических отверстий по шестиугольнику. Дальнейшая задача заключается в том, чтобы получить точечные элементы при печати через ромбические отверстия. Очевидно, что с помощью точечного источника света могут быть получены только точки также ромбической формы. Если точечный источник света заменить диском, яркость которого одинакова во всех точках, то форма точек уже будет отличаться от ромба. Можно рассчитать такую форму источника света, которая при определенном расстоянии эмульсионного слоя от растра-негатива обеспечит получение круглой точки.

В контакте с точечным растром-негативом печатается заготовка, которая после чернения, вторичного полива и соответствующей обработки превращается в линзовый растр.

Технологический процесс изготовления линзовых растров контрастным способом дает возможность изготовить растры с равномерностью поля по фокусным расстояниям до $\pm 5\%$.

Для исследования качества готовых линзовых растров в отношении профиля его линз производится снятие профилограмм, а равномерность поля по фокусу определяется путем замера величины фокусных расстояний с помощью микроскопа.

Как показали исследования, визуальная разрешающая способность линзовых элементов доходит до 300 мм^{-1} при относительном отверстии 1:6.

В настоящее время в НИКФИ заканчивается разработка нового способа, обеспечивающего получение светосильных линзовых растров, что еще больше повысит фотографическое качество изображений, получаемых растровым способом.

А. И. САЛИЩЕВ

ИСКРОВЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФОТОГРАФИРОВАНИЯ НА НЕПОДВИЖНУЮ ФОТОПЛЕНКУ

Метод искрового высокочастотного фотографирования на неподвижную фотопленку, опубликованный в 1929 г. Кранцом и Шардином [1], в силу ряда преимуществ по сравнению с другими методами — возможность производить съемку с частотой до миллиона и более снимков в секунду с получением при этом негативов больших размеров с хорошим качеством изображения, простота конструкции вследствие отсутствия каких-либо движущихся частей, простые способы синхронизации и др. — нашел себе применение во многих работах, посвященных исследованию процессов, протекающих с большой скоростью [2—5]. При этом имели место различные усовершенствования применяемой аппаратуры, которые коснулись, однако, главным образом лишь электрической ее части, т. е. электрических схем и деталей, применяемых в этом методе для получения коротких световых вспышек и для управления работой искрового осветителя; оптическая часть практически осталась без изменения, и в опубликованных оригинальных и обзорных работах первоначальная оптическая схема воспроизводится с полной неизменностью, варьируются только количества получаемых снимков [6—8].

Между тем эта схема не лишена недостатков, которые в ряде случаев ограничивают возможность применения метода. Одним из них является необходимость располагать фотографируемый объект на небольшом расстоянии от основного конденсора фотографической установки, вследствие чего при фотографировании, например, ударных явлений, сопровождающихся разрушением образца, всегда имеется опасность повредить объектив и нарушить работу установки. Применение защитных экранов из прозрачных материалов не является выходом из положения ввиду больших требований, которые в данном случае предъявляются к экранам в отношении оптической однородности их материала и качества их поверхностей.

Ввиду изложенного представляет интерес создание аналогичных установок для искровой съемки, свободных от указанного недостатка. Ниже приводится краткое описание двух таких установок.

Установка № 1

Установка разработана и построена автором в 1941 г. при участии Л. Г. Федоровича по предложению академика А. А. Лебедева. Она позволяет получать двенадцать последовательных снимков фотографируемого процесса с частотой 400 000 и 137 000 сек.⁻¹ и масштабом изображения в 0,24 натуральной величины при диаметре фотографируемого поля 110 мм.

Оптическая схема установки показана на рис. 1. Искровые разрядники A_1, A_2, \dots, A_8 и конденсоры K_1, K_2, \dots, K_8 расположены таким образом, что световые пучки, выходящие из конденсоров при появлении искр в разрядниках, сходятся и оси их пересекаются в точке, являющейся центром поля фотографирования; около этой точки помещается фотографируемый объект. По другую сторону объекта пучки расходятся и на-

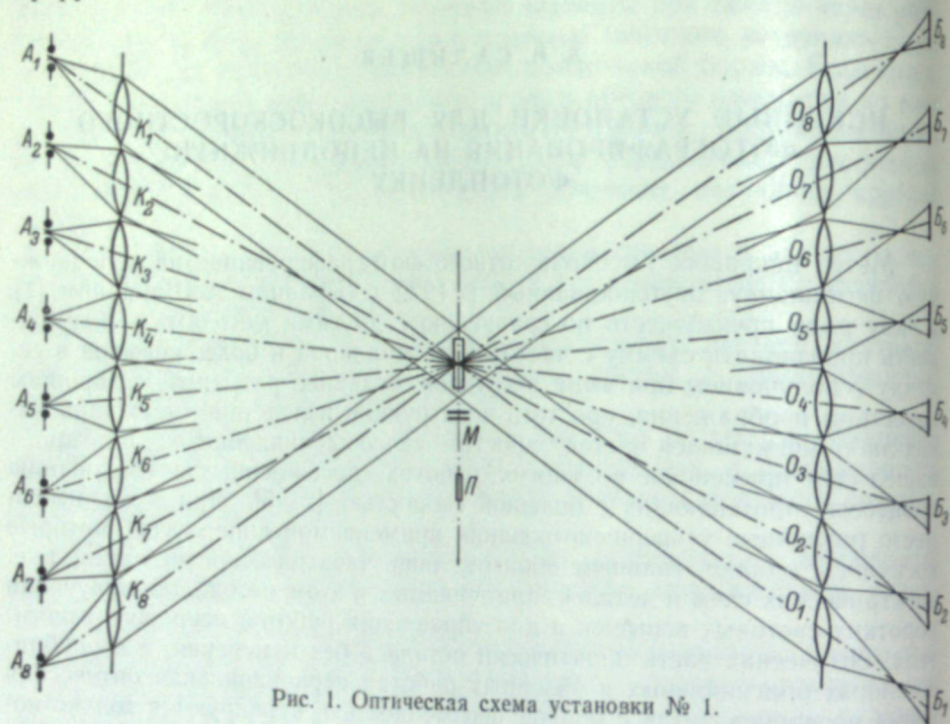


Рис. 1. Оптическая схема установки № 1.

правляются на объективы O_1, O_2, \dots, O_8 , за которыми расположена кассета с фотопленками B_1, B_2, \dots, B_8 на таком расстоянии от объективов, что на пленках получается резкое изображение объекта. Для съемки с применением поляризованного света схема дополняется светофильтром и двумя поляризаторами, помещаемыми на пути световых пучков по обе стороны объекта.

При съемке объектов, обладающих собственным свечением, возникает необходимость ослабить засветку, создаваемую этим свечением на негативах. В этом случае оптическая схема установки дополняется диафрагмами с отверстиями небольших размеров, устанавливаемыми между объективами O_1, O_2, \dots и фотопленками B_1, B_2, \dots в том месте, где световой пучок, идущий от искры, имеет наименьшее сечение. Эти диафрагмы пропускают полностью свет от искры и задерживают большую часть лучей, обусловленных свечением самого объекта.

Схема работает следующим образом. Когда в первом разряднике A_1 появляется электрическая искра, пучок света из конденсора K_1 направляется на объектив O_1 и далее на пленку B_1 и дает на ней размытое изображение освещенного отверстия конденсора K_1 с резким силуэтным изображением на его фоне фотографируемого объекта. Аналогичным образом при появлении искр в разрядниках A_2, A_3, \dots силуэтные изображения объекта получают на пленках B_2, B_3, \dots . Во время съемки искры в разрядниках A_1, A_2, A_3, \dots появляются поочередно через малые промежутки времени, выбираемые в соответствии со скоростью развития

и продолжительностью фотографируемого процесса; при этом начало серии искр в разрядниках может быть с необходимой точностью совмещено с началом или с любой другой фазой развития фотографируемого процесса. В результате на пленках B_1, B_2, B_3, \dots получается серия последовательных снимков объекта в процессе его быстрого изменения. Частота съемки определяется частотой появления искр в разрядниках.

Установка состоит из двух блоков. Один из них представляет искровой осветитель, другой — фотокамеру. Кроме того, установка дополняется двумя плоскими зеркалами, устанавливаемыми по обеим сторо-

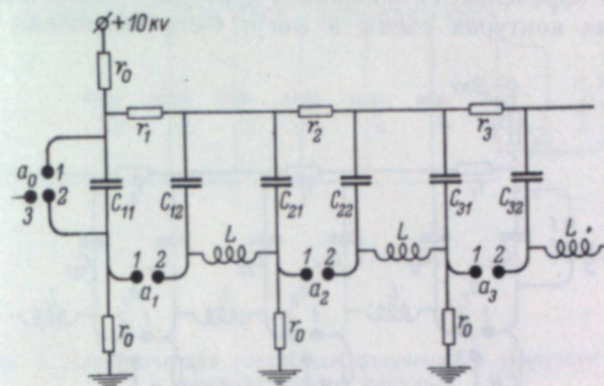


Рис. 2. Электрическая схема искрового осветителя для простых силуэтных съемок.

нам объекта под углом 45° к оси установки и позволяющими осуществить компактное расположение элементов установки. В качестве фотографирующих объективов в установке применены коллиматорные объективы с фокусным расстоянием 1600 мм и диаметром свободного отверстия 110 мм, в качестве конденсоров — двухлинзовые объективы с фокусным расстоянием 1000 мм и диаметром свободного отверстия 120 мм.

Электрическая схема искрового осветителя (для первых трех разрядников a_1, a_2, a_3) . . . показана на рис. 2; для остальных разрядников она имеет аналогичный вид. На этой схеме $C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}, C_{31}$ и C_{32} — конденсаторы разрядных контуров, r_1, r_2, r_3 — сопротивления, создающие необходимое затухание в разрядных контурах, L — катушки индуктивности в контурах связи, r_0 — сопротивления, через которые производится зарядка конденсаторов от общего источника питания, a_0 — трех-электродный пусковой разрядник.

Перед началом съемки все конденсаторы заряжаются до напряжения, немного меньшего того, при котором пробивается разрядник a_0 . При этом электроды разрядников a_1, a_2, a_3 оказываются при одинаковых потенциалах и искры в них не появляются. В момент начала съемки синхронизирующий импульс, подаваемый на электрод 3 разрядника a_0 , пробивает промежуток 3—2 и вызывает пробой промежутка 1—2, начинается заряд конденсатора C_{11} . Колебательный характер этого разряда приводит к тому, что напряжение на конденсаторе C_{11} быстро меняет знак, складываясь с напряжением конденсатора C_{12} , пробивает первый разрядник a_1 , появляется первая освещающая искра.

Благодаря наличию сопротивления r_1 разряд в первом разрядном контуре затухает настолько быстро, что искра в разряднике a_1 появляется только один раз и ток разряда проходит только в одном направлении, после чего разряд обрывается, а на конденсаторе C_{12} остается некоторый

заряд противоположного знака. Вследствие этого в контуре $C_{12}LC_{21}$, связывающем первый и второй разрядные контуры, возникают колебания и через время $\frac{T}{2}$, равное половине периода колебаний этого контура, напряжение на конденсаторе C_{21} меняет знак; складываясь с напряжением конденсатора C_{22} оно пробивает разрядный промежуток a_2 , появляется вторая освещающая искра. Аналогичным образом появляются освещающие искры последовательно во всех остальных разрядниках схемы.

В первом приближении интервалы времени τ между последовательными искрами определяются половиной периода T свободных колебаний в связывающих контурах схемы и могут быть вычислены по формуле

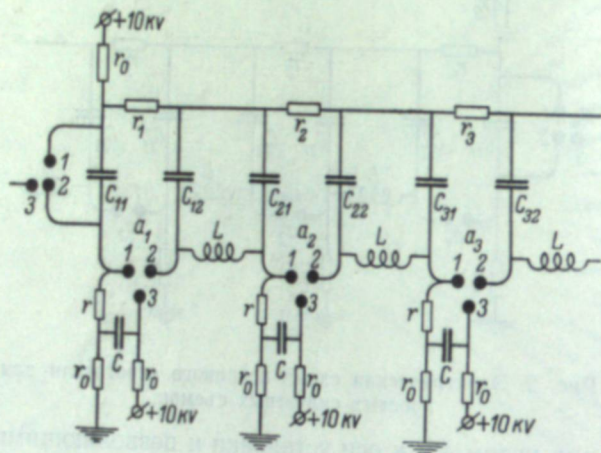


Рис. 3. Электрическая схема искрового осветителя для съемок с применением поляризованного света.

$\tau \approx \frac{T}{2} = \pi \sqrt{LC}$, где C — емкость двух последовательно соединенных конденсаторов в контурах связи, а L — индуктивность этих контуров. Эта же формула может служить для определения индуктивности L , необходимой для получения заданного τ . Более подробное рассмотрение процессов, протекающих в контурах искровой схемы, показывает, что τ должно быть меньше $\frac{T}{2}$, и более точное его значение необходимо определять экспериментально. Одним из способов этого определения является фотографирование пули, летящей с известной скоростью, с последующим измерением на снимках ее перемещений за каждый интервал. Практика измерений показывает, что этим способом величина интервалов может быть определена со средней ошибкой, не превосходящей 0,3 мксек.

При сборке осветителя применены слюдяные конденсаторы емкостью 0,01 мкф и рабочим напряжением 14 000 в; в качестве искровых промежутков использованы открытые разрядники с длиной разрядного промежутка 5—8 мм. Сопротивления $r_1, r_2, r_3 \dots$ — проволочные порядка 1—2 ом, r_0 — графитовые сопротивления порядка 1 Мом.

Во время съемки конденсаторы установки заряжаются до напряжения 10—12 кв. При указанной выше длине разрядных промежутков освещенность, создаваемая в этих условиях на фотопленках, вполне достаточна для получения удовлетворительных по плотности снимков на негативной кинопленке чувствительностью в 65 единиц ГОСТа. Для съемок с применением поляризованного света, когда требуется более мощное

освещение, применен искровой осветитель с трехэлектродными разрядниками (рис. 3). К электродам разрядников 1—3 подключены разрядные контуры с конденсаторами C емкостью в 1 мкф, сопротивления r порядка 3—4 ом обеспечивают аперриодичность разряда в этих контурах. Регулярная серия искр в разрядниках a_1, a_2, a_3 между электродами 1—2, возник-

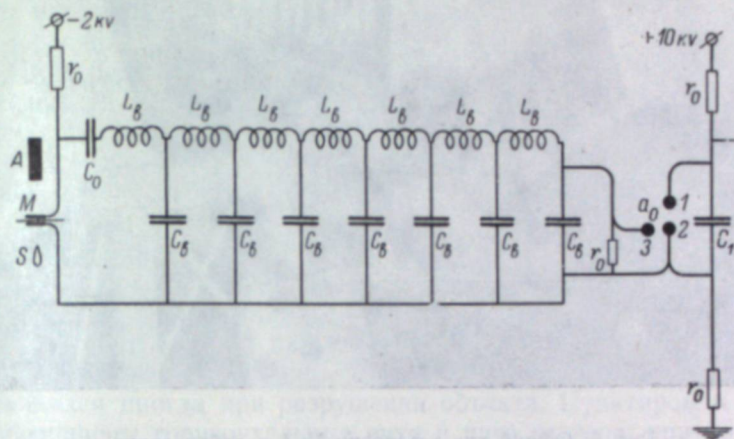


Рис. 4. Электрическая схема для получения и задержки синхронизирующего импульса.

кающая после подачи синхронизирующего импульса на электрод 3 разрядника a_0 , служит в этой схеме для управления моментом разряда конденсаторов C . Мощные световые вспышки, возникающие при этом между электродами 1—3, используются для освещения во время съемки.

На рис. 4 показана схема для получения синхронизирующего импульса. Пуля S , летящая по направлению к фотографируемому объекту A ,

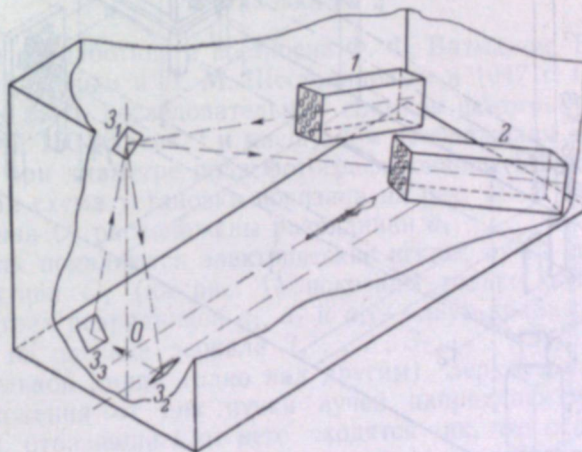


Рис. 5. Схема расположения установки № 1 в лабораторном помещении.

пробивает мишень M , поставленную на определенном расстоянии от объекта, и замыкает цепь конденсатора C_0 . Импульс, возникающий при разряде, по задерживающей линии LC подается к электроду 3 разрядника a_0 и запускает искровую схему; меняя расстояние между мишенью и объектом, можно любым образом менять момент начала съемки относи-

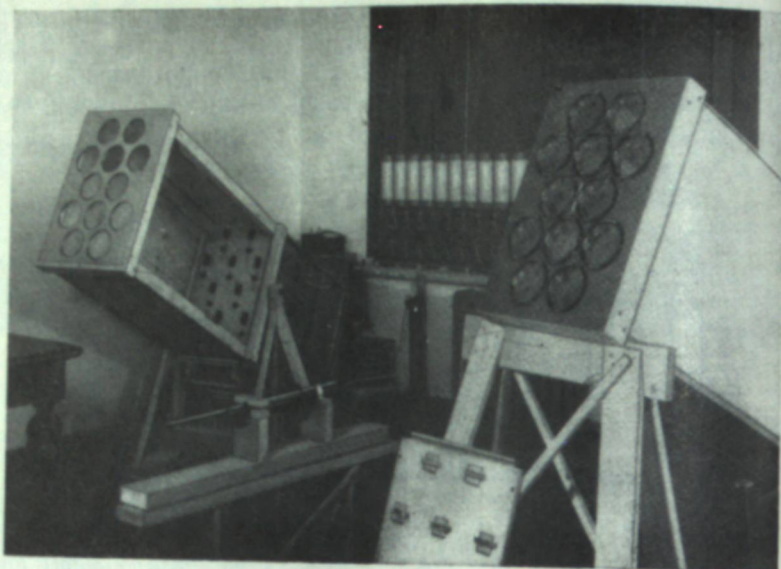


Рис. 6. Общий вид установки № 1 в лаборатории.

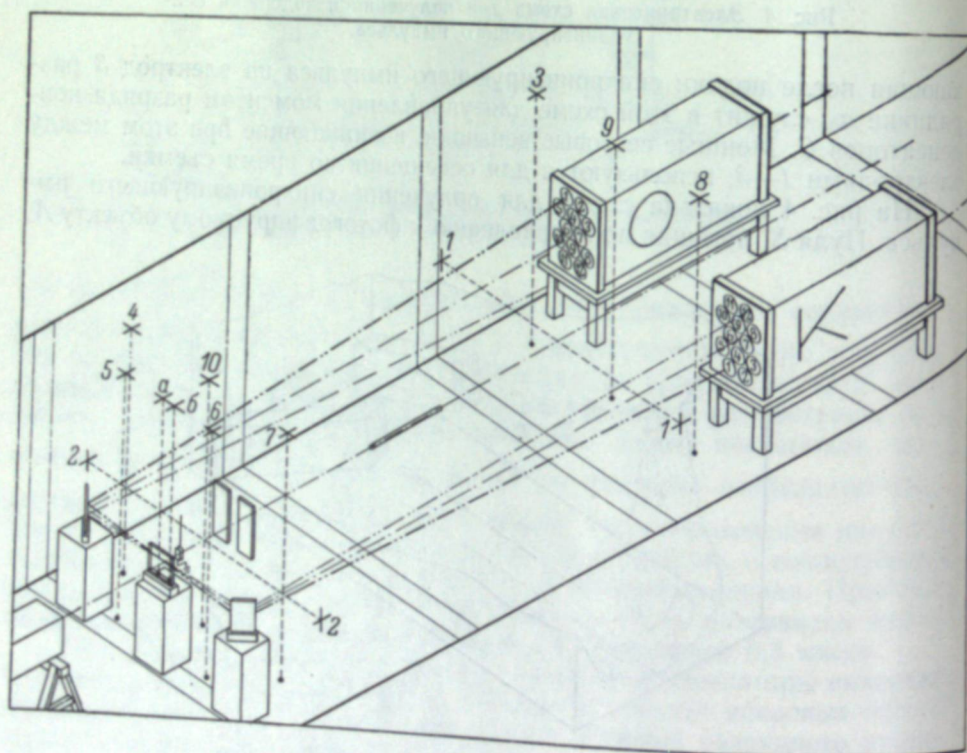


Рис. 7. Общий вид установки № 1 в тире.

тельно момента контакта пули с объектом. Линия задержки состоит из 10 звеньев и обеспечивает задержку синхронизирующего импульса на 55 мксек.

На рис. 5 и 6 показана схема и расположение установки в небольшом помещении лаборатории. Осветитель 1 (слева) и фотокамера 2 (справа)

поставлены наклонно так, что оси их пересекаются в центре зеркала Z_1 , укрепленного у потолка на противоположной стене комнаты. Внизу расположены боковые зеркала Z_2 и Z_3 . Световые пучки, выходящие из конденсоров осветителя, после отражения от зеркал Z_1, Z_2, Z_3, Z_1 направляются к соответствующим объективам фотокамеры. Оси всех пучков пересекаются в точке O , являющейся центром поля фотографирования; в эту же точку направлена ось винтовки. Осветитель и фотокамера выполнены в виде деревянной конструкции длиной 2 м, высотой 0,66 м и шириной 0,46 м. На передних стенках размещены в сотовом порядке конденсоры и объективы. В средней части осветителя имеется перегородка, на которой укреплены искровые разрядники; за перегородкой размещены детали искровой схемы; в глубине снимка на рис. 6 можно видеть конденсаторы и катушки линии задержки. Кассета с гнездами для 12 фотопленок 35×35 мм видна внизу перед фотокамерой.

На рис. 7 показано расположение установки в тире. Осветитель, фотокамера и два боковых зеркала укреплены на прочных деревянных подставках; между зеркалами на средней подставке помещается фотографируемый объект и перед ним мишень. Схематически показаны ствол винтовки и два экрана, защищающие осветитель и камеру от осколков, разлетающихся иногда при разрушении объекта. Пунктиром и цифрами 1—10 обозначены горизонтальные нити и нити отвесов, при помощи которых производится выверка установки; во время съемок они убираются. Нити отвесов a и b находятся в пределах поля фотографирования, и изображения их на снимках служат неподвижными реперами для измерения горизонтальных расстояний. Линией «тире и две точки» показаны оси световых пучков, образующих изображение на первом и двенадцатом снимках серии.

Для иллюстрации на рис. 8, 9 и 10 даны отпечатки с некоторых снимков, характеризующие работу установки № 1.

Установка № 2

Установка разработана и построена Ф. Ф. Витманом, В. А. Степановым, А. И. Салищевым и Л. М. Шестопаловым в 1947 г. Она позволяет получать тринадцать последовательных снимков фотографируемого процесса с частотой $150\,000 \text{ сек.}^{-1}$ и масштабом изображения в 0,1 натуральной величины при диаметре поля фотографирования 142 мм.

Оптическая схема установки показана на рис. 11. В фокальной плоскости объектива O_1 расположены разрядники $a_1 \dots, a_7 \dots, a_{13}$ так, что когда в них появляются электрические искры, пучки лучей, выходящие из объектива O_1 (на рис. 11 показаны только оси этих пучков и только для трех разрядников a_1, a_7 и a_{13} — двух крайних и среднего), направляются на плоские зеркала $Z_1 \dots, Z_7 \dots, Z_{13}$, размещенные вдоль вертикальной линии (одно над другим). Зеркала наклонены так, что после отражения от них пучки лучей направляются к плоскому зеркалу Z_6 , и, отразившись от него, сходятся так, что оси их пересекаются в точке O . Эта точка является центром поля фотографирования, и около нее располагается фотографируемый объект A . За точкой O пучки и олучей расходятся и после отражения от плоского зеркала Z_6 и от плоских зеркал Z'_1, Z'_7, Z'_{13} , расположенных также вдоль вертикальной линии (одно над другим), падают на объектив O_2 и затем на неподвижную фотопленку $Пл.$, давая на ней тринадцать размытых изображений освещенного отверстия объектива O_1 и на фоне их резкие силуэтные изображения объекта A . Схема работает так же, как и описанная выше схема

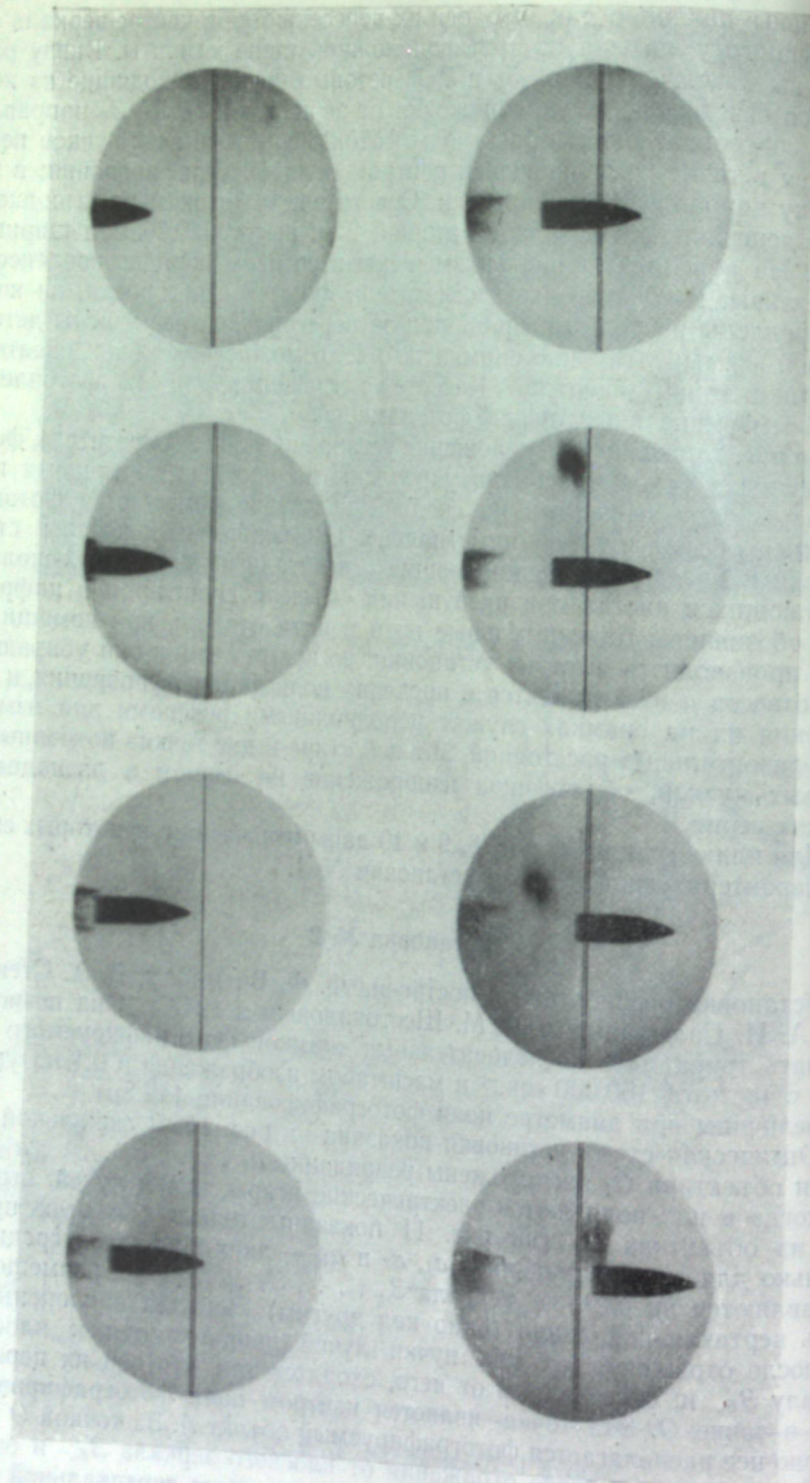


Рис. 8. Пуля, летящая со скоростью 800 м/сек., и нити двух неподвижных отвесов.
Частота съемки 137 000 сек.⁻¹

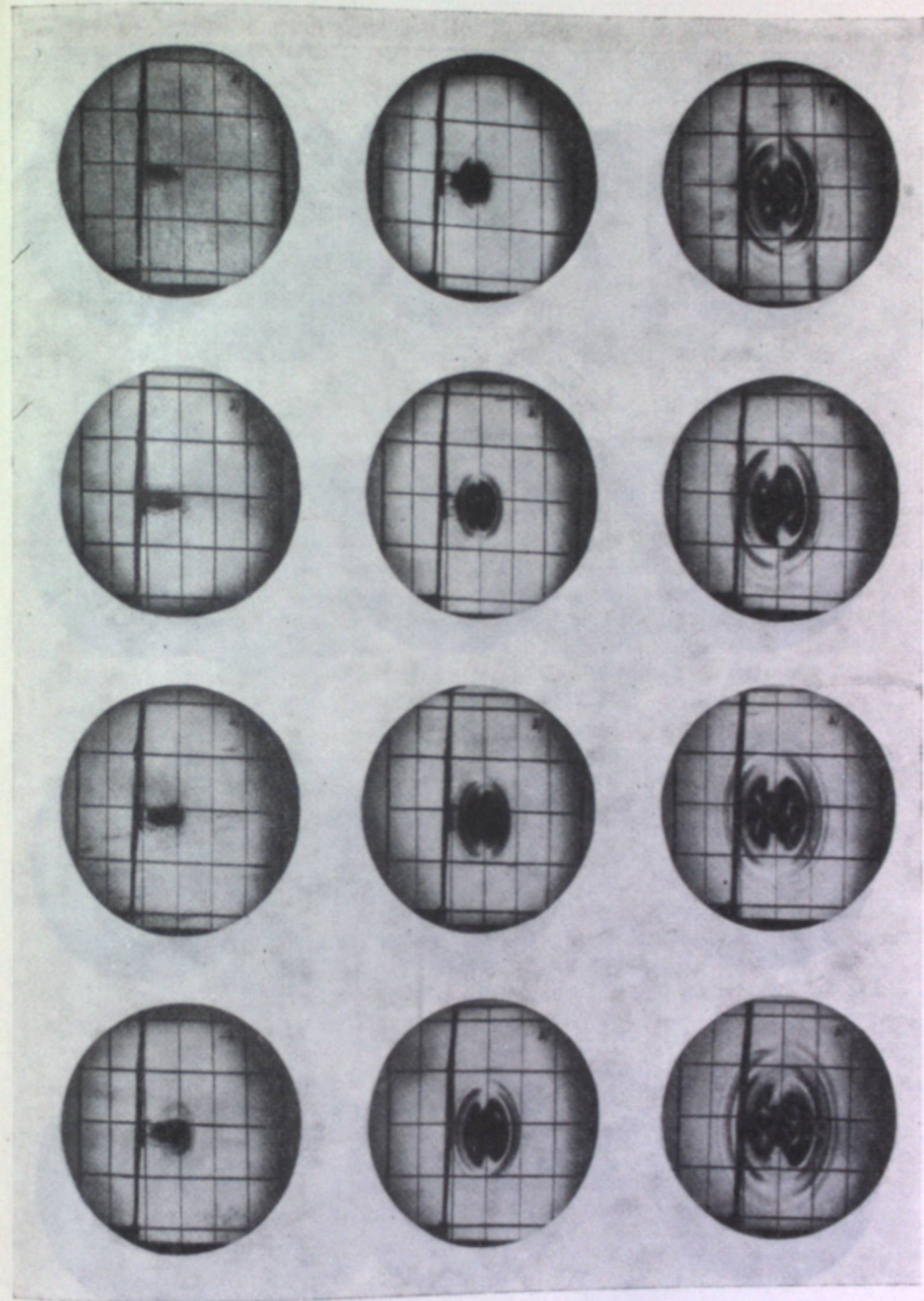


Рис. 9. Волны в пластинке органического стекла, возникающие при ударе свинцовой пули.
Пластинка сфотографирована в повернутом положении. Размеры пластинки 9 × 12 × 0,2 см, скорость пули 350 м/сек., частота съемки 400 000 сек.⁻¹

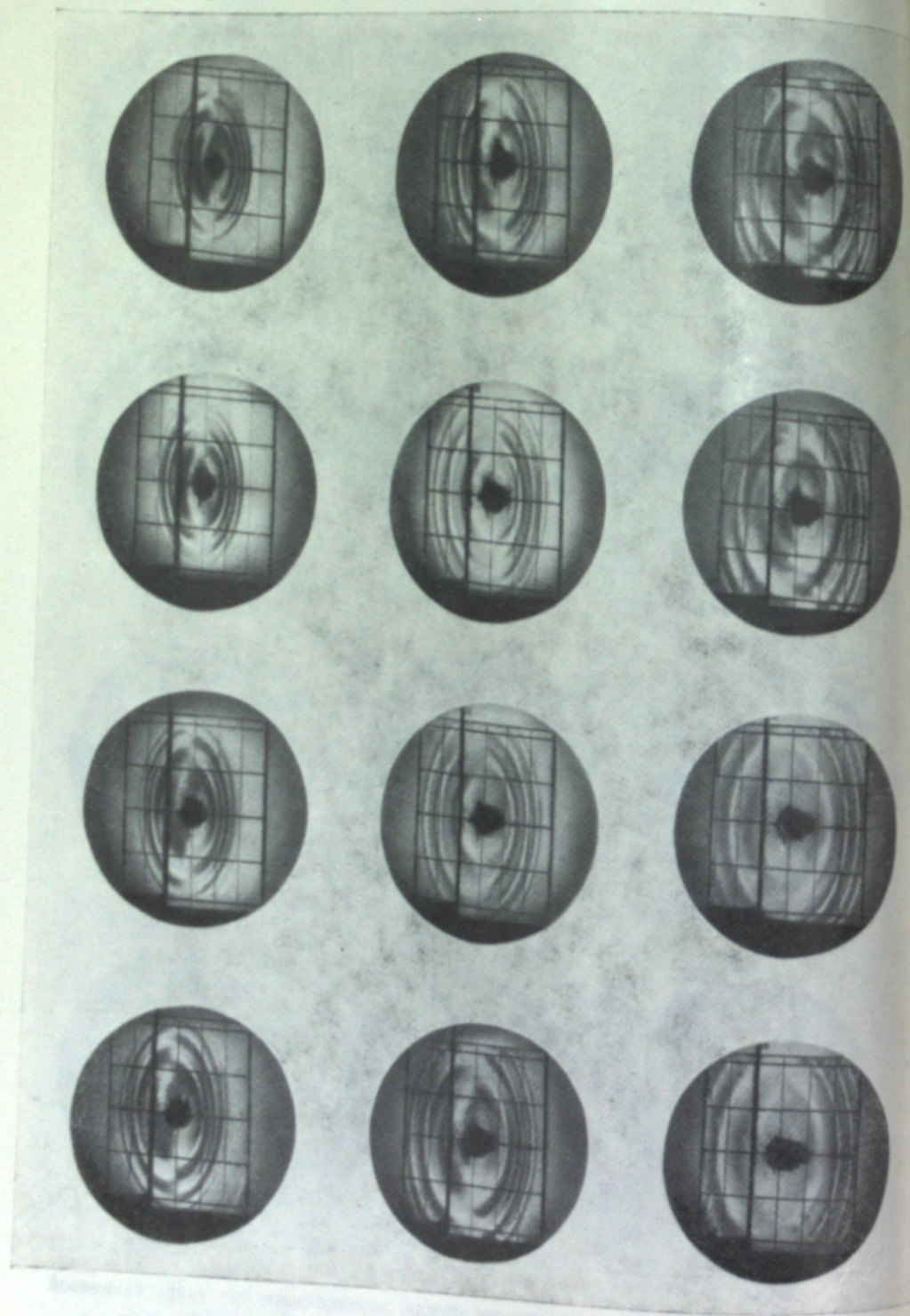


Рис. 9. (Продолжение).

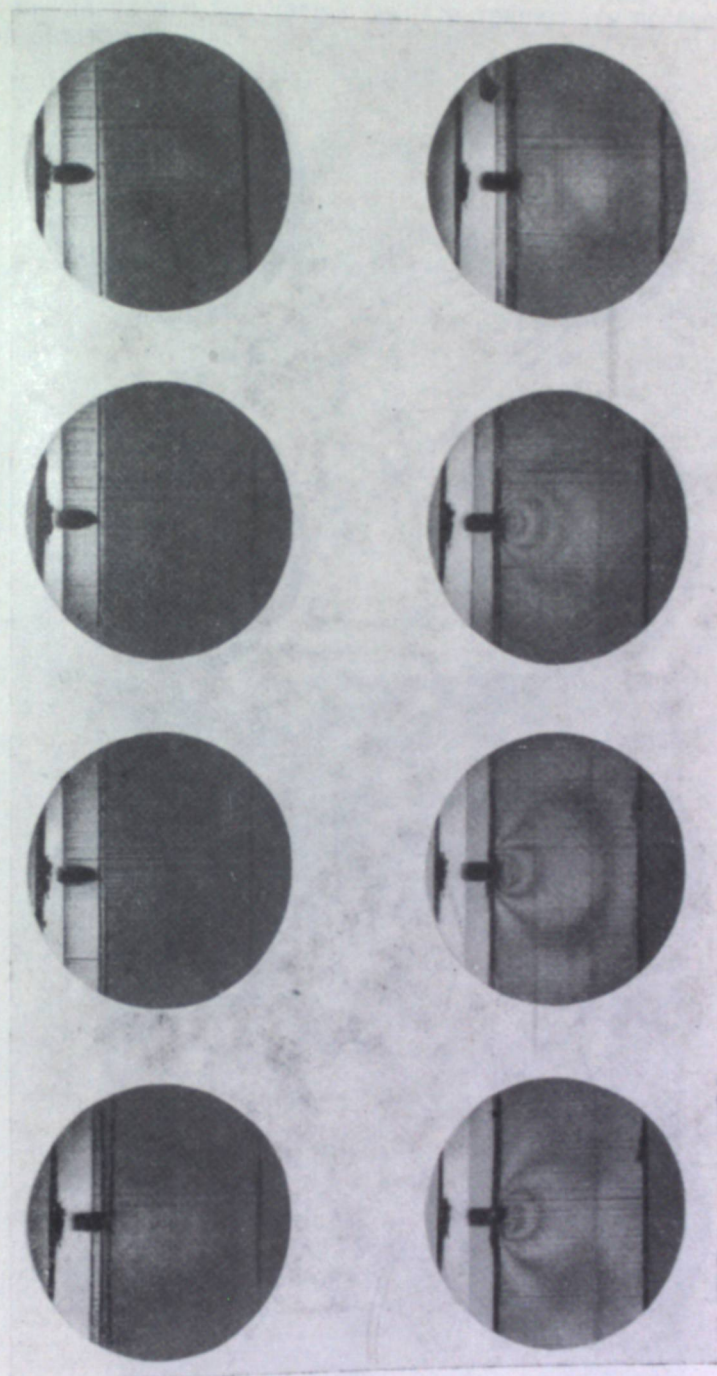


Рис. 10. Картина напряженного состояния в стеклянной плитке, возникающая при ударе свинцовой пули в середину левой боковой грани. Сфотографировано через оранжевый светофильтр и два круговых поляризатора. Размеры пластинки $90 \times 45 \times 8$ мм, скорость пули 350 м/сек., частота съемки 400 000 сек.⁻¹.

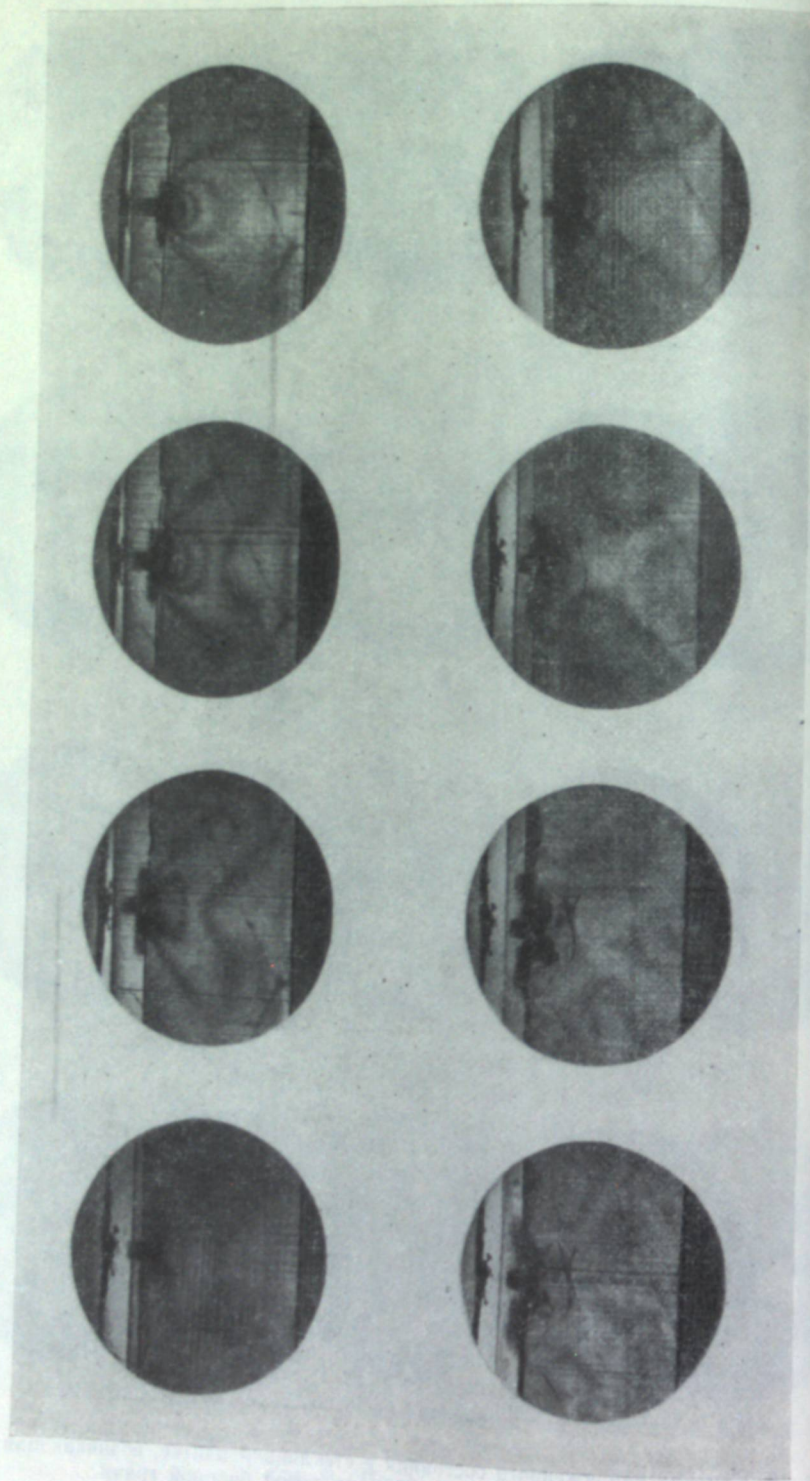


Рис. 10. (Продолжение).

установки № 1. При последовательном появлении искр в разрядниках $a_1 \dots a_{13}$ на пленке получается серия в тринадцать последовательных снимков объекта А.

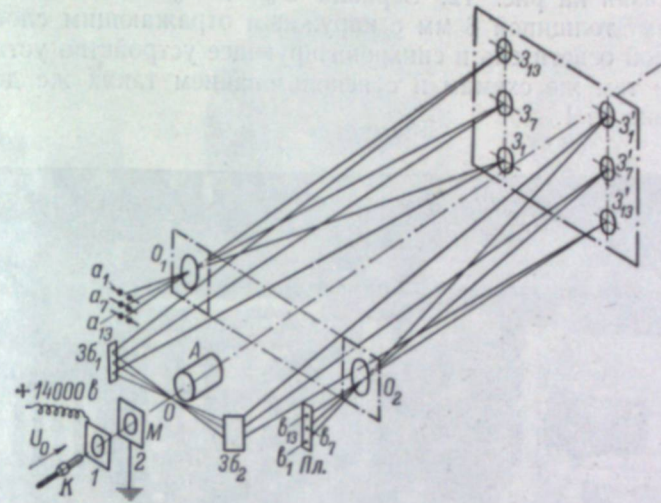


Рис. 11. Оптическая схема установки № 2.

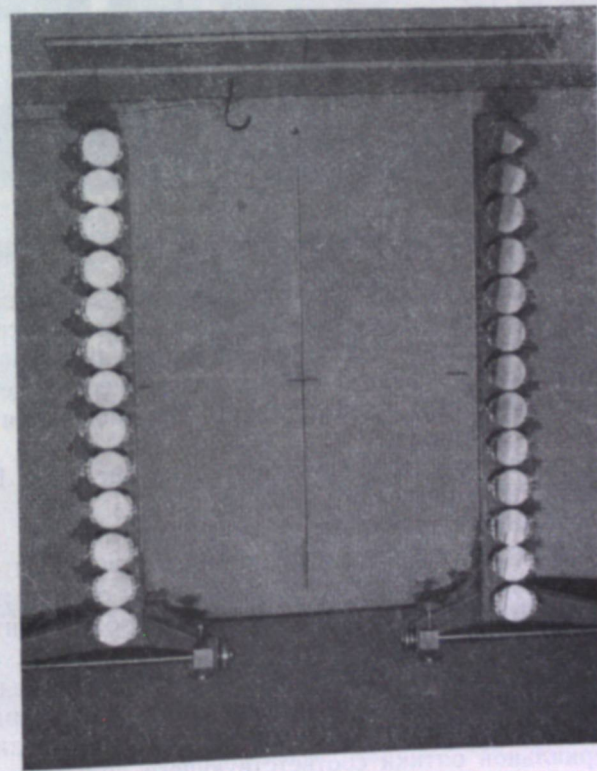


Рис. 12. Стойки с круглыми зеркалами установки № 2.

В качестве объективов камеры и осветителя в установке использован фотографический объектив с фокусным расстоянием в 1000 мм, диамет-

ром свободного отверстия в 142 мм и углом поля фотографирования в 24° . Зеркала Z_1, \dots, Z_{13} и Z'_1, \dots, Z'_{13} — круглые стеклянные диаметром 145 мм и толщиной 15 мм с зеркальным слоем алюминия. Общий вид их показан на рис. 12. Зеркала Z_6 и Z'_6 — плоские стеклянные 200×300 мм² толщиной 8 мм с наружным отражающим слоем.

Искровой осветитель и синхронизирующее устройство установки № 2 собраны по тем же схемам и с использованием таких же деталей, как и в установке № 1.

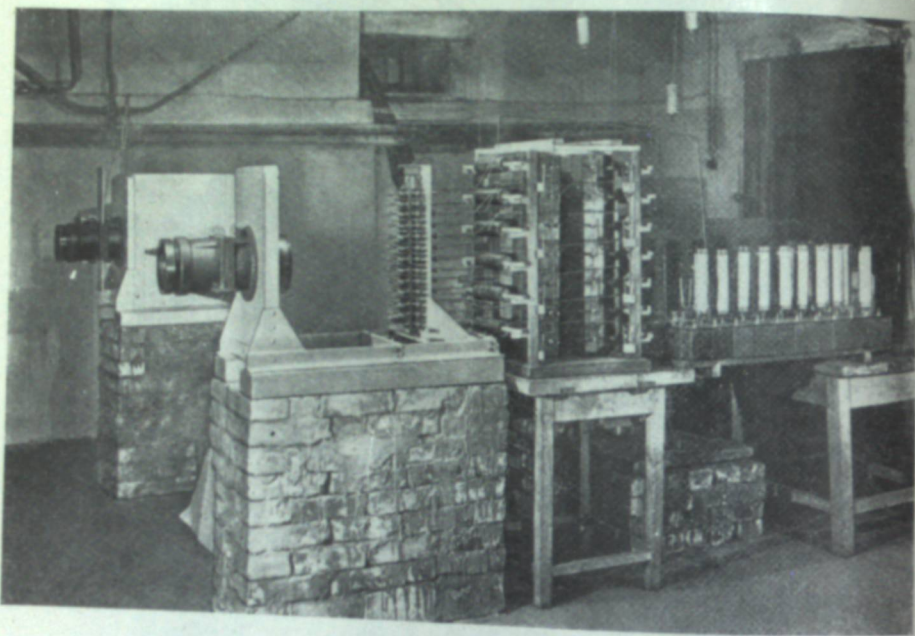


Рис. 13. Общий вид установки № 2.

На рис. 13 показан общий вид установки № 2. Слева в глубине снимка расположена фотокамера, на переднем плане — искровой осветитель и детали электрической схемы — слева вертикальная рамка с тринадцатью разрядниками, в середине — блок электрических деталей искровой схемы, в правой части — детали схемы для получения и задержки синхронизирующего импульса.

Для иллюстрации работы установки № 2 на рис. 14 и 15 приведены отпечатки с некоторых снимков.

В заключение необходимо отметить следующее.

1. Из приведенного описания двух установок видно, что устройство их настолько просто, что при наличии необходимой оптики и конденсаторов они могут быть построены самостоятельно любой заинтересованной в них оборудованной лабораторией.
2. Качество получаемых снимков может быть значительно улучшено, если в установках применить оптику, специально для них рассчитанную.
3. Размеры фотографируемого поля могут быть увеличены путем применения зеркальной оптики соответствующего диаметра.
4. Временные характеристики фотографируемых процессов, получаемые на основании измерения снимков, могут быть сделаны более точными, если установки дополнить устройством для регистрации световых вспышек во времени. Такое устройство может быть оптическим с разверткой

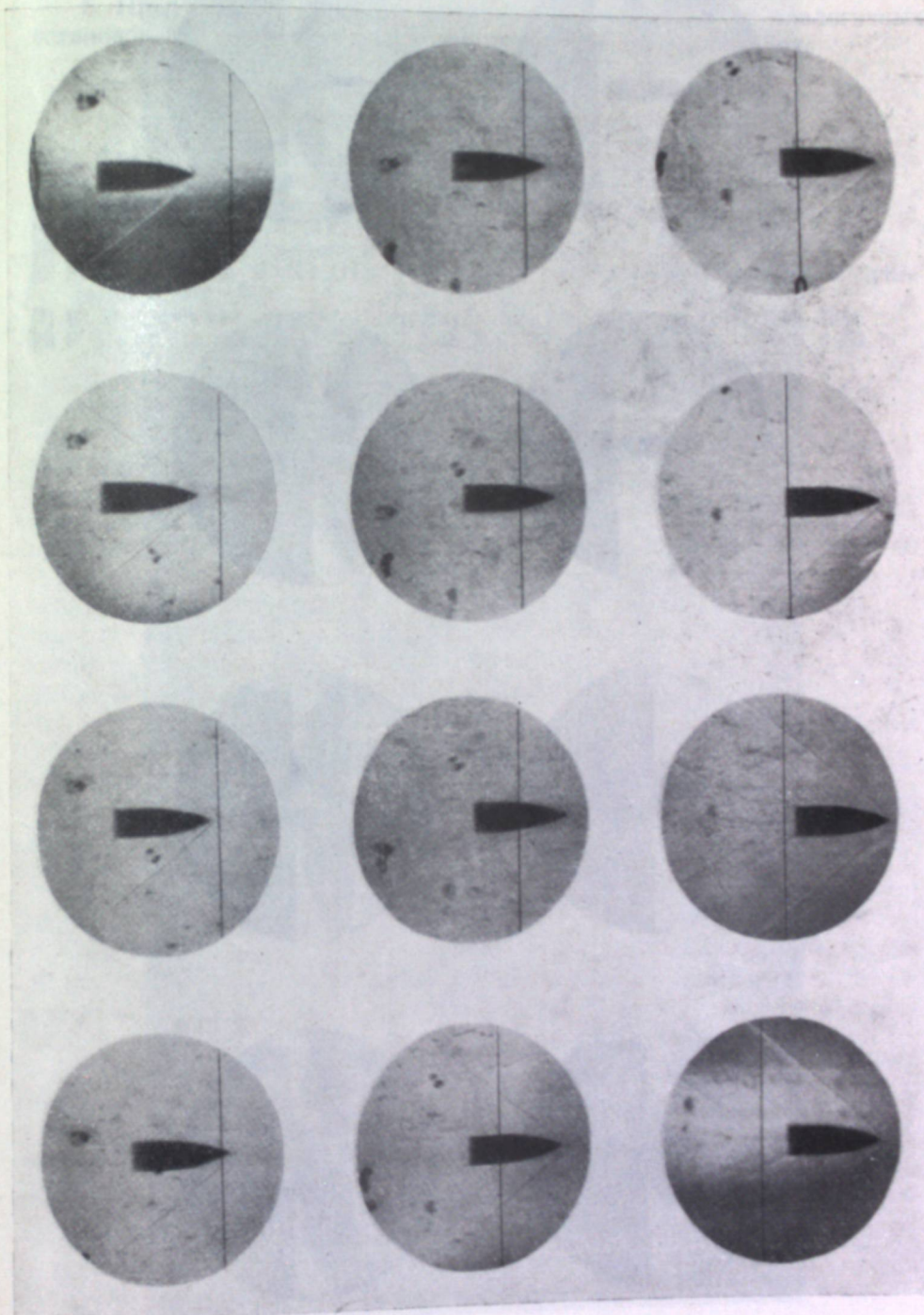


Рис. 14. Пуля, летящая со скоростью 800 м/сек., и нить неподвижного отвеса.
Частота съемки 150 000 сек.⁻¹.

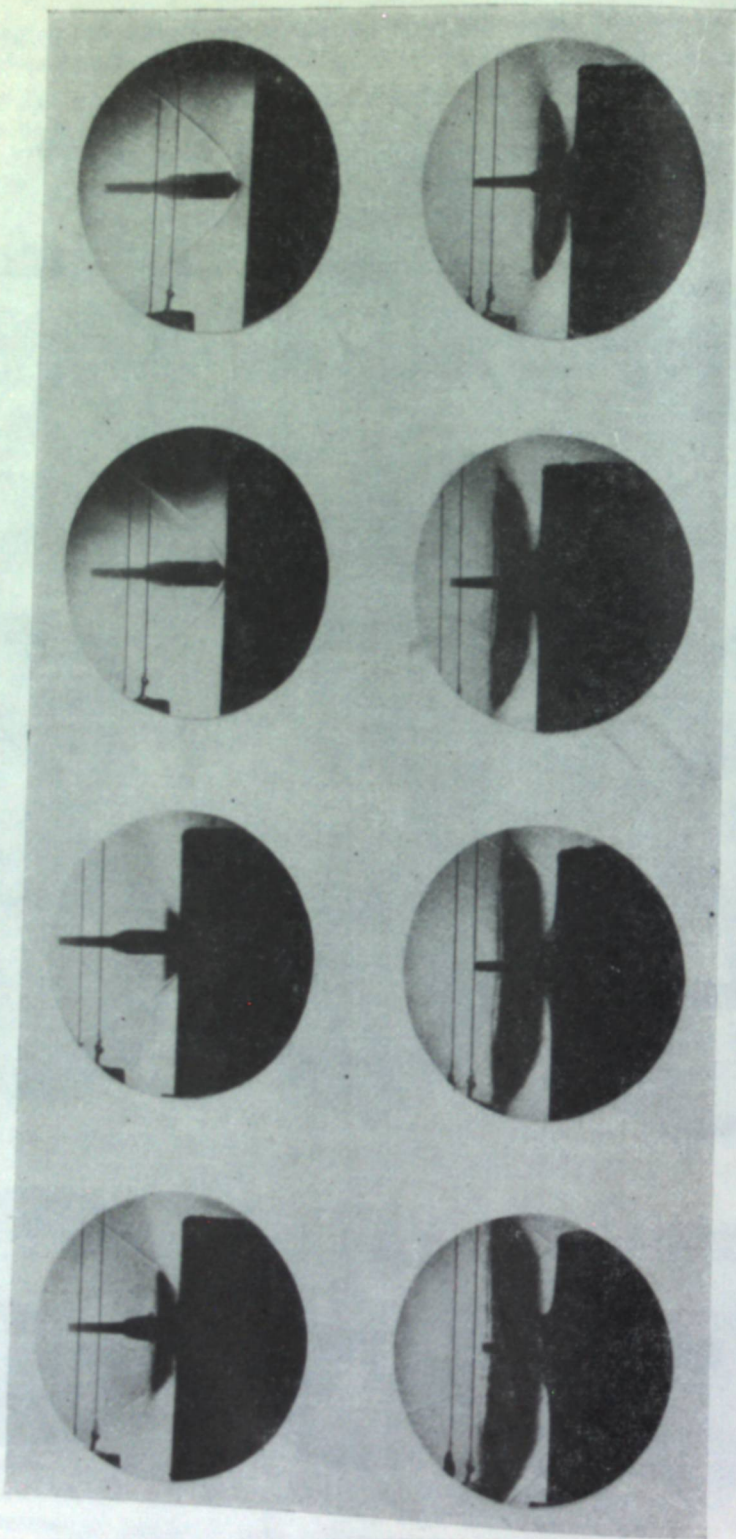


Рис. 15. Процесс внедрения стального закаленного конуса в свинец.
Начальная скорость 770 м/сек., частота съемки 150 000 сек.⁻¹.

на движущейся пленке или фотоэлектрическим с разверткой на экране осциллографа.

5. Представляется вполне возможным осуществление аналогичных установок для получения силуэтных снимков в двух проекциях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] C. Cranz und H. Schardin, Z. Phys., 56, 147, 1929.
- [2] H. Schardin und W. Struth, Z. techn. Phys., 18, 474, 1937.
- [3] H. Schardin und W. Struth, Glastechnische Berichte, 16, 219, 1938.
- [4] H. Schardin, D. Elle, W. Struth, Z. techn. Phys., 21, 393, 1940.
- [5] H. Schardin, Z. angew. Phys., 5, 19, 1953.
- [6] P. Fayolle et P. Naslin, Photographie instantanée et cinématographie ultra-rapide, Paris, 1950.
- [7] W. D. Chesterman. The photographic study of rapid events. Oxford, 1951.
- [8] P. Fayolle and P. Naslin, J. Soc. Mot. Pict. Telev. Engrs., 60, 603, 1953.

Ю. Н. ГОРОХОВСКИЙ

ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ФОТОГРАФИИ И КИНЕМАТОГРАФИИ

(Реферат доклада)

Высокоскоростное фотографирование требует применения особо высокочувствительных и в ряде случаев высокоразрешающих фотографических материалов. Ввиду существования известного явления невзаимозаменяемости фотографические материалы, обладающие хорошими свойствами при обычных условиях освещения и выдержках порядка $0,1 \div 0,01$ сек., оказываются часто неудовлетворительными при выдержках порядка $10^{-5} \div 10^{-6}$ сек. Поэтому для данной цели необходимы специальные фотографические материалы.

В докладе рассматриваются сенситометрические свойства современных негативных фотографических материалов в широком диапазоне соотношений освещенностей и выдержек и излагается вопрос о том, как влияют на эти свойства эмульсионно-технологические факторы и условия химико-фотографической обработки. В частности, рассматриваются соответствующие свойства многослойных цветных пленок.

В докладе описываются методы измерения сенситометрических свойств фотографических материалов при коротких выдержках и выдвигаются задачи, связанные с созданием для этих целей надлежащей контрольно-испытательной аппаратуры.

Н. И. РЫНДЕНКОВ

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ТОЧНЫХ ПРИБОРОВ

(Реферат доклада)

Обработка весьма мелких по величине деталей производится на высоких числах оборотов, когда наблюдение за ходом процесса невооруженным глазом практически невозможно.

Применение скоростной киносъемки в часовом производстве, несмотря на малость размеров деталей и быстроходность станков, оказалось весьма эффективным даже в случае применения упрощенной съемочной аппаратуры. (Во время доклада демонстрировалась аппаратура для высокоскоростной киносъемки).

Киноисследования в основном были направлены на установление причин образования заусенцев при обработке деталей часов. Кинофильмы показали наличие определенных пределов скорости резания, при которых происходит образование заусенцев; выявлены так называемые критические скорости резания, при которых образуются заусенцы.

Установлены условия резания, при которых не происходит искажения формы деталей. Предложены способы устранения заусенцев в процессе обработки.

На основе освоенных приемов исследований необходимо создать стандартную съемочную аппаратуру, допускающую легкость, быстроту и точность установки, а также оборудование для обработки пленки.

Следует организовать общий координационный центр по применению кино для научных исследований, обеспечивающий обмен опытом, устранение дублирования и своевременную публикацию проверенных методик и достигнутых практических результатов.

С. П. ТАМБОВЦЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МИКРОКИНОСЪЕМКИ

(Реферат доклада)

Несмотря на большое количество опытов по резанию металлов, значительная часть вопросов управления процессами снятия стружки до настоящего времени остается нерешенной.

Одной из наиболее важных сторон этого вопроса является установление влияния пластической деформации на формирование поверхностного слоя обрабатываемого изделия. В этом отношении применение скоростного кино позволяет выявить истинную картину изменений поверхности детали. Скоростная киносъемка дает также возможность выявлять многие ненормальности в процессе резания, в том числе, например, прерывность в работе станков, зависящую от неправильной их наладки, недостаточного точного и жесткого крепления детали и инструмента, чрезмерно большого вылета резцов и т. д.

Установлено, что при формировании стружки, отходящей со срезаемого слоя, образуются небольшие группы деформированных кристаллов, названных субэлементами.

При обработке вязких металлов, таких, как сталь 10-15, сталь 20, жаропрочная сталь 1×13 (ЭЖ-1), техническое железо, высокопрочный чугун и т. п., наблюдается образование над лезвием инструмента давящего кома, состоящего из групп разрушенных кристаллов. Ком металла «подменяет» собой лезвие инструмента, увеличивает объем пластической деформации, отжимает линию среза в сторону изделия, приводя к искажению формы изделия, к нарушению заданных размеров детали и к ухудшению качества поверхности изделия. При увеличении глубины резания явление образования кома становится еще более отчетливым и ком перерастает в форму крупного сгустка металла, называемого «консолью».

В настоящее время настоятельно необходимо расширение количества и улучшение качества выпускаемой аппаратуры для скоростной киносъемки, а также необходим выпуск дешифраторов, осветительных приборов и т. п.

С. Р. ЖУКОВСКИЙ, В. К. ПЕРЕВЕРЗЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛИЗАЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ МЕТОДОМ СКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ

Бурное развитие новых отраслей современной техники требует изыскания новых материалов, обладающих специфическими электрическими и иными свойствами. Эти изыскания ведутся по различным направлениям. Одним из них является нанесение на поверхность рабочей детали конструкции защитных или обладающих специальными свойствами покрытий.

Опыт многих предприятий показывает, что металлизация распылением относится к числу наиболее широко и успешно применяющихся методов нанесения покрытий. Принцип металлизации распылением заключается в нанесении на соответственно подготовленную поверхность распыляемого при плавлении металла.

В данном сообщении приводятся результаты изучения некоторых этапов процесса проволоочной электрометаллизации. Принцип нанесения покрытий этим методом показан на рис. 1. В данном случае плавление

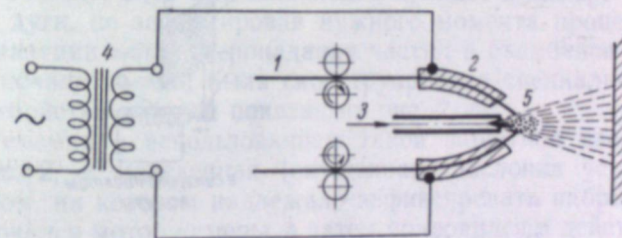


Рис. 1. Принципиальная схема электродуговой установки для металлизации.

1 — проволоочные электроды, 2 — направляющие, 3 — сжатый воздух, 4 — трансформатор, 5 — очаг плавления.

проволоки (исходного металла для покрытия) производится тепловой энергией электрических разрядов, а распыление — струей сжатого газа (в частности, воздуха).

Несмотря на то, что техника и технология металлизации распылением просты, механизм процесса образования покрытий во многом еще не ясен. При изучении физической картины таких явлений, как плавление, диспергирование металла, перенос частиц на основание, их деформирование и другие изменения, возникают большие трудности. В частности, это вытекает из того, что названные явления протекают в чрезвычайно короткие промежутки времени (в тысячные доли секунды). Опыт изучения указанных явлений методом киносъемки с частотой до 5 000 сек.⁻¹ позволили получить лишь указания на то, что для подобных исследований необхо-

димо применять киносъемку с частотой порядка нескольких десятков тысяч кадров в секунду. Предыдущие работы показали также, что необходимо применять скоростную микрокиносъемку, так как поперечник многих образующихся при металлизации частиц имеет величину порядка нескольких десятков микрон.

Изложенным выше условиям по диапазону съемочных скоростей отвечает наша новая отечественная высокоскоростная киносъемочная ка-

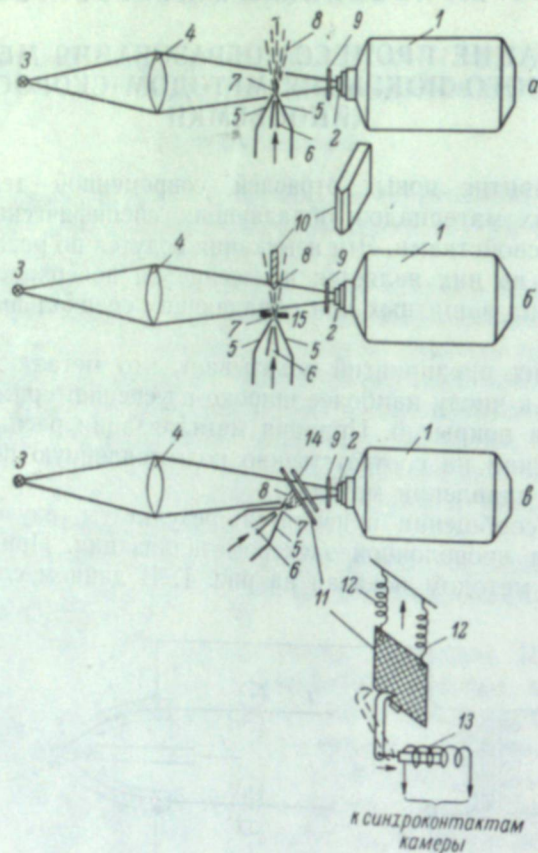


Рис. 2. Принципиальные схемы съемок.
1 — камера ФП-22, 2 — объектив камер, 3 — источник света, 4 — линза, 5 — проволочные электроды, 6 — сопло дутьевого газа, 7 — очаг плавления, 8 — частицы расплавленного металла, 9 — защитное стекло, 10 — остроконечная пластина (основание), 11 — защитная заслонка для синхронизации начала съемки, 12 — пружины заслонки, 13 — электромагнит, 14 — стекло для напыления металла, 15 — ограничивающая щель.

мера ФП-22. С помощью съемок камерой ФП-22 были проведены следующие три этапа исследования изменений, применяемого для покрытия металла (стали и алюминия): 1) в очаге плавления, 2) в процессе переноса из очага плавления на основание и 3) на поверхности наращиваемого основания. В результате ряда предварительных проб нами в дальнейшем производились съемки указанных этапов изучаемого процесса с частотами 10 000, 25 000 и 50 000 сек.⁻¹ при размещении объекта съемки на расстояниях в 50, 25 и 15 см, т. е. равных 10—3 фокусным расстояниям объектива камеры.

На рис. 2, а показана схема киносъемки при изучении процесса изменения металла в очаге плавления. В поле зрения объектива камеры

фиксируются только концы электродов 5, между которыми возникала электрическая дуга и небольшое пространство перед электродами.

Для изучения образующихся частиц расплавленного металла при переносе на основание использовалась схема съемки, приведенная на рис. 2, б. Ребро пластинки 10, на которое производилось напыление, имело шероховатую (зазубренную) поверхность. В поле зрения камеры фиксировался только силуэтный контур ребра этой пластинки. Для выделенно на острие ребра распыления узкой полосы частиц, летящих навстречу, устанавливалась стальная ограничивающая щель 15 шириной около 8 мм.

При съемках объектов с очень близких расстояний (для предохранения объектива камеры от неизбежных повреждений брызгами расплавленного металла) во всех схемах киносъемок применялось защитное плоско-параллельное стекло 9. Вопрос синхронизации момента начала съемки на первых двух этапах нашего исследования решался просто и не вызывал никаких затруднений, так как камера включалась лишь после того, как металлизационный аппарат начинал устойчиво работать.

Совершенно другие условия имели место при изучении процесса изменения частиц расплавленного металла при ударе. Здесь съемка объекта осуществлялась на расстоянии 15 см от камеры и съемочное пространство ограничивалось весьма малыми размерами (1,2×0,9 см). Таким образом, поле съемки представляло собой поверхность стекла площадью в 1 см², на которой требовалось зафиксировать набрызгивание частиц расплавленного металла. При этих условиях, если производить съемку без специальных приемов синхронизации, то зафиксировать нужную стадию процесса можно только случайно, так как в большинстве случаев будет заснят либо уже полностью забрызганный участок стекла (который станет непрозрачным), либо вся киноплёнка пройдет в камере между двумя вспышками дуги, не зафиксировав нужного момента процесса. Поэтому для синхронизации момента попадания частиц в съемочное пространство и момента начала съемки была сконструирована специальная заслонка, принцип устройства которой показан на рис. 2, г.

Схема съемки с использованием такой защитной заслонки приведена на рис. 2, в. Взведенная (опущенная) заслонка устанавливалась перед стеклом, на котором надлежало зафиксировать набрызгивание металла. Включался мотор камеры, а затем приводился в действие металлизационный аппарат, который начинал напылять металл сперва на защитную заслонку, и лишь после установления устойчивого горения дуги нажималась кнопка «съемка». На обмотку электромагнита защитной заслонки от синхроконтрактов работающей камеры подавалось вспомогательное напряжение, заставляющее сработать сердечник и освободить оттянутую вниз заслонку от удерживающего крючка. Под действием пружин заслонка отбрасывалась вверх, открывая путь для напыления металла на стекло.

В данной работе оказалось возможным использовать в качестве источника света для съемок теньевым методом вместо лампы СВДШ-250-3 более простую и удобную в обращении кинолампу К-22 (30 в, 400 вт), работающую от автотрансформатора, что позволяло устанавливать оптимальные значения яркости светового фона при съемках в проходящем свете.

Для более детального изучения заснятых явлений применялся покадровый анализ каждого фрагмента. В качестве покадрового проектора был приспособлен фильмоскоп МГУ-53. На рис. 3 показаны некоторые кадры заснятых фрагментов.

В итоге проведенной работы выяснен характер испарения и плавления проволоки, проанализирован отрыв и унос частиц, выявлена зависи-

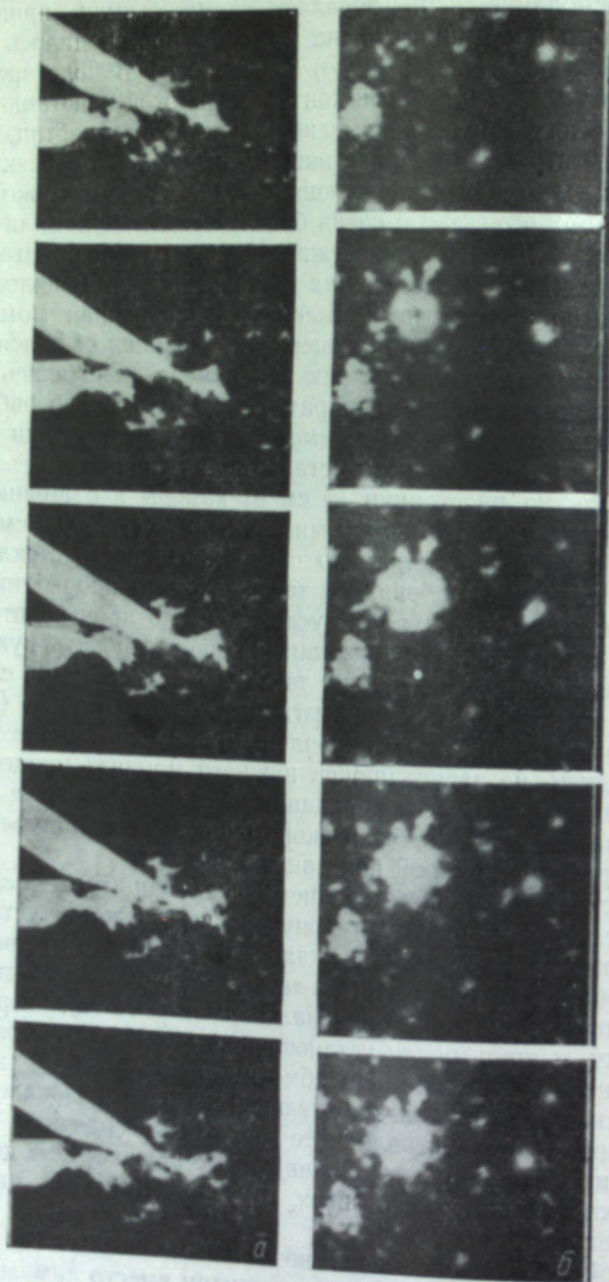


Рис. 3. Кадры отдельных этапов процесса образования металлизационного покрытия.

a — в очаге плавления (частота съемки 50 000 сек.⁻¹), *б* — на поверхности наращиваемого основания (частота съемки 25 000 сек.⁻¹).

мость между процессом диспергирования металла и периодичностью электрических разрядов, получена характеристика образующихся частиц,

выявлены диспергирование и коагуляция частиц в полете, проанализировано движение частиц, определен характер охлаждения частиц, выявлен характер деформации частиц, проанализирована кристаллизация частиц на подкладке.

Полученные данные по изменению исходного металла с момента его плавления до образования из него покрытия в сочетании с результатами других разделов этого комплексного исследования приводят к обобщающим выводам о процессе образования металлизационных покрытий.

В заключение обзора нашей работы мы считаем уместным и необходимым сказать несколько слов и о самой камере. На основании проведенных съемок камерой ФП-22 следует отметить, что, несмотря на ряд конструктивных недостатков, вполне естественных и неизбежных при выпуске первых образцов новой аппаратуры, камера работает безотказно, вполне отвечая тем задачам, для решения которых она предназначена. Камера позволяет получить изображение хорошего качества, удовлетворяющее требованиям, которые можно предъявить к киносъемкам, выполненным с подобными скоростями. С этой точки зрения камера ФП-22 заслуживает самой положительной оценки.

В настоящей работе уяснение методов изучения процесса образования металлизационного покрытия с помощью кинокамеры ФП-22 и анализ полученных результатов. В работе описаны условия проведения съемки, результаты исследования процесса образования металлизационного покрытия, выявлены основные этапы процесса, определены характерные особенности движения частиц в полете, характер охлаждения частиц, характер деформации частиц, проанализирована кристаллизация частиц на подкладке.

Съемки на объективометрической камере ФП-22 проводились с помощью объектива с фокусным расстоянием 10 мм, длиной 20 мм и шириной 20 мм с помощью катушки проволоки диаметром 0,1 мм и длиной 10 мм. В одном кадре с помощью объектива ФП-22 удалось снять 10 кадров. Процесс образования металлизационного покрытия с помощью кинокамеры ФП-22 проводился в том же режиме, что и в работе [1]. Процесс образования металлизационного покрытия с помощью кинокамеры ФП-22 проводился в том же режиме, что и в работе [1]. Процесс образования металлизационного покрытия с помощью кинокамеры ФП-22 проводился в том же режиме, что и в работе [1].

В работе описаны условия проведения съемки, результаты исследования процесса образования металлизационного покрытия, выявлены основные этапы процесса, определены характерные особенности движения частиц в полете, характер охлаждения частиц, характер деформации частиц, проанализирована кристаллизация частиц на подкладке.

А. Н. ХАНУКАЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ СКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ

1. При подрыве твердых горных пород основная часть энергии заряда взрывчатого вещества расходуется на создание в толще массива мощной ударной волны, распространяющейся от места взрыва по всем направлениям. Воздействием этой волны на обнаженные поверхности массива обусловлена основная часть разрушений, возникающих при взрыве. Лишь небольшая часть объема, примыкающая непосредственно к заряду, разрушается под воздействием самих газов взрыва.

Поэтому для практических целей приобретает существенное значение детальное изучение процесса разрушения под воздействием ударной волны. Одним из возможных методов для этого является воспроизведение процесса разрушения на моделях из прозрачных материалов и фотографирование процесса в его развитии с помощью камеры для скоростной киносъемки.

2. В настоящей работе указанным методом исследовался наиболее простой случай разрушения ударной волной стержней прямоугольного сечения.

Стержни из органического стекла толщиной 10 мм, длиной 200 мм и шириной 20 мм с помощью двух проволок свободно подвешивались к шкале с делениями. На одном конце стержня укреплялся плоский заряд азида свинца. Поперечное сечение зарядов было принято равным поперечному сечению разрушаемого стержня. Плотность заряда была равна двум, скорость детонации в нем 3200 м/сек. Вес зарядов выбирался равным 0,5, 0,7 и 0,9 г, соответственно чему толщина их была равна 1,25, 1,75 и 2,25 мм. При взрыве заряда от другого конца стержня под воздействием ударной волны отрывался один или несколько кусков. Число отрывающихся кусков зависело от величины заряда, которым определялась длина ударной волны в стержне и ее интенсивность (амплитуда).

Процесс разрушения стержней фотографировался с помощью скоростной фотокамеры ФП-22. Частота съемки была равна 98 600 сек.⁻¹. В качестве источника света при съемках использовалась угольная дуга с автоматической регулировкой расстояния между уголями.

3. Под воздействием газов взрыва вдоль стержня распространяется волна сжатия. Ее длина λ определяется скоростью ее распространения c_p и продолжительностью воздействия газов взрыва на конец стержня, зависящей от толщины заряда. В данной работе она вычислялась по формуле

$$\lambda = c_p \cdot t_{отр.}$$

где $t_{отр.}$ — промежуток времени, в течение которого продолжалось отражение волны сжатия от конца стержня. Обе величины c_p и $t_{отр.}$ опреде-

лялись с помощью промера положения переднего фронта волны на снимках.

Для зарядов весом 0,5, 0,7 и 0,9 г значение λ оказалось равным 10,7, 17,2 и 21,4 см. Зависимость λ от толщины заряда m показана на рис. 1. В первом приближении ее можно считать линейной.

4. Волна сжатия, достигнув конца стержня, отражается от него в виде волны растяжения; в результате их интерференции напряжение в каждом сечении стержня определяется суммой напряжений, создаваемых падающей и отраженной волной. На конце стержня оно равно нулю, так как в этом месте напряжения, создаваемые падающей и отраженной волной, в любой момент времени равны и противоположны по знаку. По мере удаления от конца стержня, на максимальное растягивающее напряжение, создаваемое фронтом отраженной волны, накладывается все более уменьшающееся напряжение сжатия хвостовой части падающей волны, в результате чего в стержне растут растягивающие напряжения и в том месте, где они достигают предела прочности материала на разрыв, происходит отрыв конца стержня.

Число кусков, отрывающихся от конца стержня, зависит от величины заряда, определяемой в данном случае его толщиной. Так при заряде 0,5 г, как правило, отрывался один кусок, при заряде 0,7 г — 3 ÷ 4 куска, а при заряде 0,9 г — 4 ÷ 5 кусков. Зависимость числа оторвавшихся кусков стержня от толщины заряда в пределах результатов данного исследования оказалась приблизительно линейной.

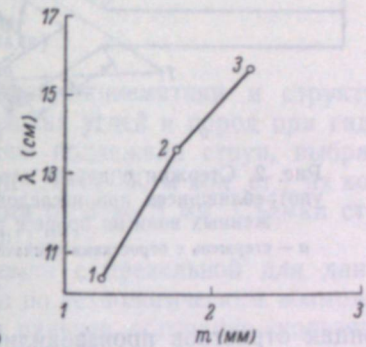


Рис. 1. Зависимость длины ударной волны в стержне от толщины плоского заряда.

Суммарная длина оторвавшихся кусков во всех случаях была несколько меньше половины длины волны сжатия, соответствующей данному заряду. Удвоенная суммарная длина оторвавшихся кусков определяет, таким образом, эффективную часть волны сжатия.

5. В иностранной и в отечественной литературе высказывалось мнение, что последовательный отрыв нескольких кусков от конца стержня обусловлен воздействием падающей волны сжатия на образующиеся в процессе отрыва новые поверхности. Изучение киноплёнки показало, что это представление является ошибочным. Число отрывающихся кусков зависит от амплитуды и продолжительности воздействия волны на свободный конец стержня, т. е. от длины волны и максимального давления, возникающего на фронте волны. Для зарядов весом 0,5, 0,7 и 0,9 г изменения дали для продолжительности воздействия соответственно через 50, 80 и 100 мксек. Начало растяжения наступало соответственно через 250, 200 и 40, 35 и 30 мксек., а сквозные трещины появлялись через 250, 200 и 120 мксек., т. е. уже после полного отражения волны от конца стержня.

6. Изучение на киноплёнках процесса образования трещин показывает, что скорость роста трещин с увеличением заряда растет; однако даже в случае самых больших зарядов, применявшихся в данном исследовании, она всегда остается меньше скорости распространения упругих деформаций. Максимальная измеренная скорость роста трещин оказалась равной 200 м/сек.

7. В горных разработках получил большое распространение метод

работы, при котором вместо одновременного подрыва всех заложенных зарядов, взрывы их производятся поочередно через малые промежутки времени, измеряемые миллисекундами. Как показывает практика, при этом методе значительно повышается эффективность использования энергии взрыва. Установлено, что одной из причин этого являются интерференционные явления, имеющие место при отражении упругих волн от свободной поверхности. Для определения оптимального интервала времени между последовательно отражающимися от границы волнами был применен описанный выше метод фотографирования процесса разрушения на моделях. Были изготовлены из органического стекла стержни (бруски) с двумя отростками одинаковой и различной длины (рис. 2). На

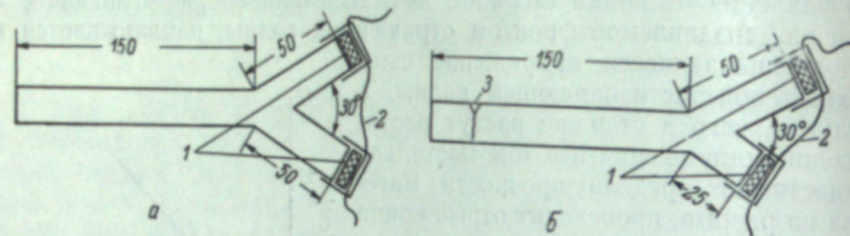


Рис. 2. Стержни с двумя отростками одинаковой и различной длины, употреблявшиеся при исследовании влияния интерференции двух отраженных волн на процесс разрушения свободного конца стержня.
а — стержень с отростками одинаковой длины, б — стержень с отростками различной длины.

концах отростков производились одновременно взрывы зарядов азидо свинца, создававшие в отростках ударные волны, которые, распространяясь по стержню, вызвали разрушение его свободного конца. Процесс распространения упругих волн и разрушения свободного конца стержня фотографировался на кинолентку с помощью скоростной фотокамеры ФП-22 при частоте съемки 98 600 сек.⁻¹.

В результате исследования установлено, что наибольшее разрушение свободного конца стержня достигается при такой длине отростков, когда между ударными волнами создается сдвиг, равный $0,25 \div 0,33$ длины волны.

8. Для дальнейшего развития описанного здесь метода изучения на моделях процесса разрушения горных пород под воздействием ударной волны взрыва необходимо увеличение частоты съемки до $0,5 \div 2,5 \cdot 10^6$ сек.⁻¹, так как частота съемки в 98 600 сек.⁻¹, даваемая камерой ФП-22, совершенно недостаточна для фотографирования процесса развития трещин, особенно в таких материалах, в которых скорость распространения упругих волн достигает 4 000 м/сек. и более.

Л. П. СЕВЕРИН

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОМОНИТОРНЫХ СТРУЙ МЕТОДОМ СКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ

(Реферат доклада)

Целью исследований являлось изучение кинематики и структуры струй, используемых для разрушения крепких углей и пород при гидромеханизации горных работ. Исследованию подлежали струи, выбрасываемые насосом под давлением до 200 ата ($H=2\ 000$ м вод. ст.) из конических насадок с выходными отверстиями от 3 до 5 мм. Съемки струй производились с помощью кинокамеры ФП-22.

Более желательным было провести съемки с предельной для данной камеры частотой ($100\ 000$ сек.⁻¹). Однако по технологическим возможностям камеры (частая поломка приводных пальцев, обгорание скользящих контактов и др.) максимальную скорость киносъемки удалось применить в единичных случаях, с весьма низким качеством кадров. В основном съемка велась при частоте $50\ 000$ сек.⁻¹, а в ряде случаев и $25\ 000$ сек.⁻¹. Из 98 проведенных съемок качественными оказались лишь 25. Нечеткость кадров в подавляющем большинстве съемок заставила исполнителей проанализировать технологический процесс их получения.

Если принять обозначения: h — частота киносъемки, d — фактический диаметр снимаемой струи, v — фактическая скорость струи, то можно вывести, что

$$h > \frac{6v}{d}.$$

В условиях проводившихся экспериментов предельная скорость струи составляла около 200 м/сек. Для отмеченных условий h изменяется от $120\ 000$ сек.⁻¹ до $240\ 000$ сек.⁻¹. Из этого видно, что разрешающая частота кинокамеры ФП-22 для исследования струй высокого давления недостаточна.

При $h=50\ 000$ сек.⁻¹ и $d=0,012$ м будет

$$v < 100 \text{ м/сек.},$$

а напор, согласно Торичелли,

$$H < 500 \text{ м вод. ст.}$$

или давление

$$P < 50 \text{ ата.}$$

При таких давлениях кинокадры струй оказались качественными, а при $P=100$ ата и $h=50\ 000$ сек.⁻¹ недостаточно четкими.

Покадровое изучение материалов киносъемки позволило установить значения коэффициентов скорости, оказавшихся близкими к 1 (0,98 при

$P=15$ ати; 0,985 при $P=30$ ати; 1,00 при $P=50$ ати). Изучение распределения скоростей в сечениях струи на кинокадрах на расстоянии от насадка, соответствующих 150 диаметрам струи, показало близость его к равномерному, что не согласуется с имеющимися до сих пор представлениями. Отставание в движении происходит лишь для оторвавшихся частичек и в пределах волновых выбросов струи, но и здесь разность не превышает 10%. Этот факт, а также высокие значения коэффициента скорости указывают на слабое влияние сопротивления воздуха на указанном расстоянии при движении струи, что также расходится с общепринятыми воззрениями.

Этим же методом удалось определить углы расширения струи при различных давлениях и диаметрах насадков, а также частоту волн и пульсаций по длине струи.

Струя при давлении 2 ати и диаметре насадка 5 мм, будучи плотной (на расстоянии 125-кратном диаметру), на фотографии имеет в местах углублений толщину 3,9 мм; расширения же струи имеют вид волн, доводящих толщину струи до 6,3 мм. При давлениях 15 ати волны приобретают форму языков, концы которых почти не загнуты назад, причем сама струя еще плотная. С дальнейшим увеличением давления струя на том же расстоянии приобретает все более разорванный вид. Внутри тела струи появляются сквозные воздушные полости, языки удлиняются и начинают загигаться назад, частицы начинают отрываться от тела струи, местами разрывается само тело струи.

Получив с помощью скоростной киносъемки указанное выше представление о структуре струи, не удалось, однако, установить закон распределения частиц жидкости по длине струи, что важно знать для создания теории гидромониторных струй. Нельзя также упускать из виду возможности оптических искажений при съемке. В частности, силуэтная съемка струи на просвет (в «светлом поле») ввиду наложения друг на друга отдельных разорванных областей струи, несомненно, показывает более плотную структуру, чем это имеет место на самом деле.

Для устранения этих недочетов была разработана, рассчитана и изготовлена специальная система линз, позволяющая «просветить» толщу струи и получить на кадрах ее внутреннее строение (в «темном поле»). Однако освоить этот способ освещения исполнителям еще не удалось.

Б. Н. ЗОЛОТЫХ и А. И. КРУГЛОВ

СКОРОСТНАЯ СЪЕМКА ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА В ЖИДКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДЕ С ПОМОЩЬЮ КАМЕР СКС-1 И СФР, А ТАКЖЕ В РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧАХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИССЛЕДОВАНИЮ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Изучение физических закономерностей эрозии металлов под действием импульсного электрического разряда, имеющего место при электроискровой (электроэрозионной) обработке металлов, представляет значительные трудности, связанные с характерными чертами объекта исследования. Эти трудности связаны с нестационарным, кратковременным характером процесса, укладываемогося в интервал времени порядка 10^{-5} — 10^{-3} сек., а также с локализованностью явления в весьма ограниченном объеме пространства, при малых межэлектродных расстояниях.

До настоящего времени исследования электрической эрозии проводились на основе изучения экспериментальных данных, устанавливающих конечные результаты явления. Эти данные определяют конечный результат действия основных физических процессов, лежащих в основе интересующего нас явления, но ни в какой степени не дают представления о динамике процесса — о ходе электрической эрозии во времени под действием единичного импульса. Отсутствие сведений о динамике процесса делает весьма затруднительным правильное построение механизма процесса и в конечном итоге построение физической теории электрической эрозии в импульсном разряде в целом. Электрический импульсный разряд между металлическими электродами, погруженными в жидкую диэлектрическую среду, помимо эрозии электрода, сопровождается целым рядом явлений: образованием проводящего канала разряда, газового пудом зыря, ударных волн в жидкости и др. Эти явления для данных параметров разряда и величин искрового промежутка изучены весьма недостаточно. Скоростная фотографическая съемка в данном случае представляет собой один из наиболее надежных и удобных методов исследования.

Однако фотографические методы исследования в оптической части спектра вследствие высокой оптической яркости канала разряда не могут дать каких-либо сведений о динамике процесса эрозии электродов на тех стадиях развития разряда, пока существует канал разряда. Наиболее надежным методом, позволяющим изучить динамику формирования эрозионной лунки на электродах, является скоростная съемка в рентгеновских лучах с помощью импульсных рентгеновских трубок. В этом случае оптическое излучение канала разряда не мешает фиксировать теневое изображение любой стадии процесса эрозии электродов. Здесь излагается часть результатов работ, выполненных Б. Н. Золотых в 1950—1957 гг. А. И. Кругловым разработана схема синхронизации для камеры СКС-1 применительно к нашему конкретному случаю исследования.

лучей была использована острофокусная трубка с холодным катодом, разработанная Э. М. Рейхруделем [3]. Трубка такого типа дает импульс рентгеновского излучения длительностью $\approx 1-3$ мксек. Принципиальная схема установки приведена на рис. 2.

Источником высокого напряжения для трубки *РТ* служит каскадная схема удвоения, собранная на конденсаторах типа ИМ110—0,01. Конденсаторы заряжаются от источника постоянного напряжения 70 кв через водяные сопротивления в 10—20 Мом. При пробое искрового промежутка f_1 конденсаторы включаются последовательно, и на трубку попадает импульс напряжения удвоенной амплитуды.

Схема всей установки работает следующим образом. С помощью ключа K_1 через сопротивление R заряжается конденсатор рабочего контура C , который после зарядки отключается от цепи питания. Замыканием ключа K_2 через импульсный трансформатор T_1 на поджигающее устройство f_3 подается инициирующий импульс. Вследствие этого исследуемый промежуток пробивается, а конденсатор C разряжается через исследуемые электроды 1 и 2. В момент пробоя с делителя (C_1, C_2) поступает сигнал на вход блока задержки задающего импульса IV . На выходе блока III появляется инициирующий импульс, который поджигает разряд в промежутке f , вследствие чего пробивается промежуток f_2 , на трубку поступает импульс высокого напряжения и трубка дает вспышку рентгеновского излучения.

Появление импульса рентгеновского излучения может быть либо синхронным с началом разряда между электродами 1 и 2, либо может быть задержано на любое заданное время относительно начала разряда. В нашем случае это время ступенчато регулируется от 10 до 2 000 мксек.

Мы рассмотрели вариант кадровой съемки. Кроме этого вида съемки, легко осуществляется вариант непрерывной съемки на движущуюся пленку. В этом случае трубка должна давать определенное количество вспышек излучения через заданные интервалы времени. Предельная скорость съемки, которая была нами получена с использованием существующих конструкций трубок, не превосходит $10-15 \cdot 10^3$ сек. $^{-1}$.

При исследовании процесса эрозии электродов методами рентгеноимпульсной теневой съемки и скоростной фотосъемки мы пользовались униполярными импульсами тока длительностью от 100 до 500 мксек. и с запасом энергии около 4—5 дж.

Экспериментальные данные

Результаты оптической скоростной съемки процесса эрозии в жидкой среде (керосине), вызванной единичным импульсом для $t_{и.} = 500$ мксек. и $W_{и.} = 5$ дж 1 , приведены на рис. 3 и 4. Плоский электрод — анод (сталь), проволока — катод (медь). Скоростная фотосъемка с частотой 5 000 сек. $^{-1}$ (рис. 3, 1 кадр 1) показывает, что в начале разряда (первые 20—50 мксек.) между электродами появляется небольшое облачко паров, которое постепенно расширяется со скоростью около 50 м/сек., принимая шаровидную форму. К концу импульса, т. е. примерно через 400—500 мксек. (кадр 3) после начала разряда, оно достигает максимальных размеров, причем температура его начинает на периферии падать. Примерно к исходу 750 мксек. (кадр 4) вместо облака формируется газовый пузырь, который некоторое время (в течение 250 мксек.) расширяется (кадр 5) с небольшой скоростью 3—5 м/сек. Внутри газового пузыря отчетливо видны траектории разлетающихся частиц. Скорость движения частиц

$^1 t_{и.}$ — длительность импульса, а $W_{и.}$ — энергия импульса.



Рис. 3. Кадры скоростной съемки искрового разряда в керосине между стальным анодом и медным катодом. Частота съемки 5 000 сек. $^{-1}$.

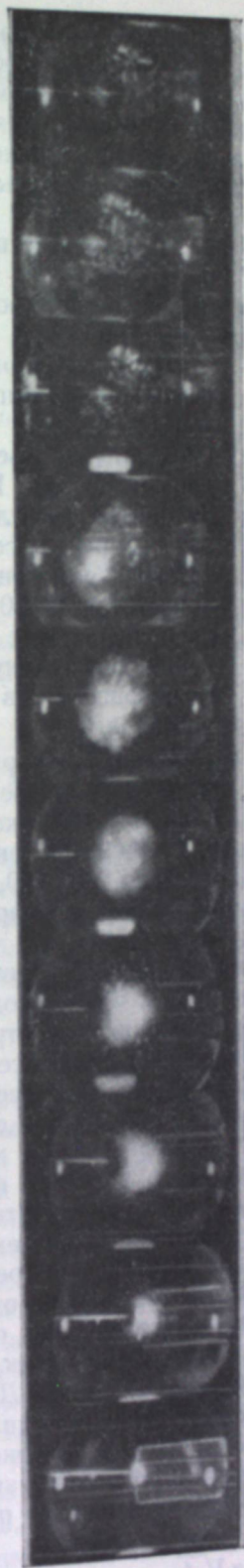


Рис. 4. Кадры скоростной съемки разряда между стальным (анод) и медным (проволочка — катод) электродами. Среда — керосин. Частота съемки 62 500 сек. $^{-1}$.

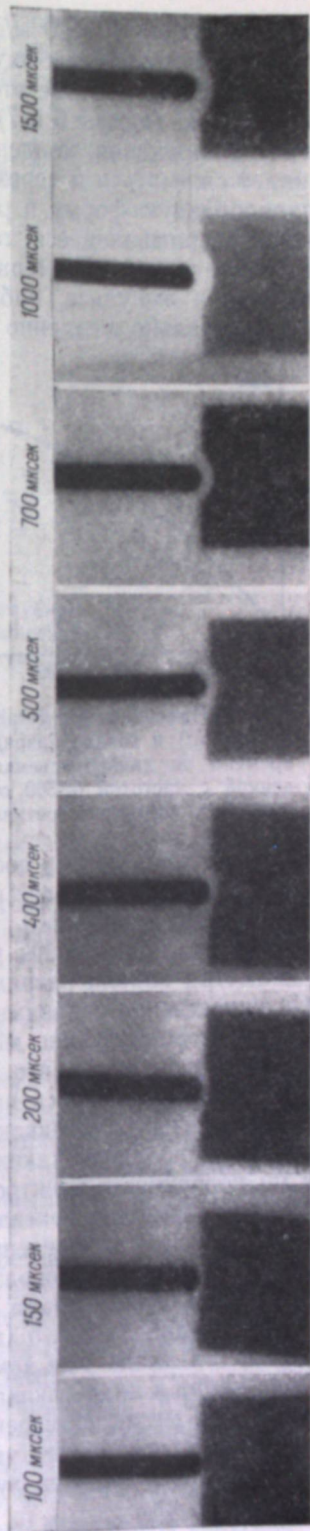


Рис. 5. Кадры теневой съемки роста лунки в электроде. Съемка в рентгеновских лучах при различном времени задержки относительно начала импульса. Длительность импульса 200 мксек., анод — сталь, катод — медь.

имеет порядок 10—20 м/сек., постепенно затухая по мере приближения частицы к стенке газового пузыря, где частицы, вероятно, охлаждаются и исчезают вследствие этого из поля зрения. Примерно через 1000—1200 мксек. (кадры 6 и 7) после начала импульса газовый пузырь вследствие охлаждения, конденсации паров и гидростатического давления начинает сжиматься и через 2000—2250 мксек. (кадры 9, 10) теряет свою шарообразную форму и распадается, превращаясь в бесформенное, медленно расплывающееся, темное облако мелких частиц.

Заметим, что примерно через 1000—1250 мксек. (кадр 6 и 7), считая от начала импульса, наблюдается выброс с электродов более крупных и относительно медленно движущихся частиц.

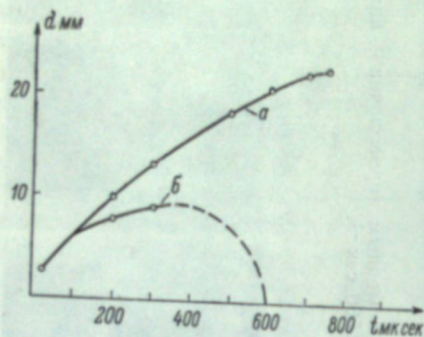


Рис. 6. Изменение диаметра газового пузыря (а) и канала разряда (б) во времени по данным съемки, выполненной с частотой 62 500 сек.⁻¹. Погрешность измерений составляет 25%.

искрового промежутка соответственно через 200, 300, 400, 500, 600, 700, 900 и 1000 мксек. после начала импульса тока. Кадр 10 рис. 3 соответствует кадру 4 на рис. 3.

На рис. 6 приведены результаты измерения диаметра газового пузыря и диаметра канала разряда. Легко видеть, что гидродинамические явления существенно запаздывают по отношению к электрическим и, вероятно, имеют существенно меньшее значение в процессе эрозии.

Несмотря на то, что скоростная съемка дает весьма богатый материал о начале выброса частиц жидкого металла, о структуре канала и газового пузыря, возникающего в процессе разряда, мы не можем с помощью ее получить каких-либо данных о процессе формирования лунки на поверхности электрода в течение импульса. Эти данные дает возможность получить теньевая рентгено-импульсная съемка.

На рис. 5 приведены результаты теньевой рентгено-импульсной съемки электродов для различных моментов времени относительно начала импульса. Условия опыта тождественны со случаем скоростной съемки.

Как видно из рис. 5 (кадр 1), к исходу 100 мксек, с момента начала разряда на аноде уже заметно образование лунки. Далее легко видеть, что от кадра к кадру лунка продолжает увеличиваться в размерах вплоть до $t = 1500$ мксек. Измерения для данного случая показали, что глубина лунки растет медленнее, чем ее диаметр. При этом зависимость увеличения глубины и радиуса лунки от времени в первом приближении имеет следующий вид

$$\xi = \alpha \sqrt{t},$$

где ξ — глубина или радиус лунки, α — постоянная величина.

На рис. 4 приведены результаты фотосъемки, выполненной с частотой 62 500 сек.⁻¹ при тех же условиях опыта. Съемка была произведена в течение 1000 мксек., считая от начала импульса тока. Эти данные, в целом, совпадают с результатами, полученными при съемке с частотой 5000 сек.⁻¹, но позволяют внести ряд существенных уточнений в картину процессов, разыгрывающихся в искровом промежутке.

Кадр 1 на рис. 4 соответствует 35 мксек. после начала разряда, кадр 2 — 100 мксек., кадры 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 фиксируют состояние

На рис. 7 приведены зависимость диаметра и глубины лунки от времени для $t_{и.} = 100; 200$ и 500 мксек. при $W_{и.} \approx 5$ дж. График построен по данным рентгено-импульсной съемки. По оси абсцисс отложена безраз-

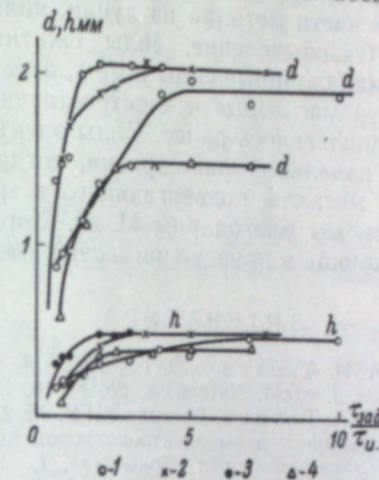


Рис. 7. Зависимость диаметра и глубины единичной эрозионной лунки от отношения $\tau_{зад.}/\tau_{и.}$ по данным рентгено-импульсной съемки.

1 — длительность импульса 100 мксек., анод — сталь;
2 — длительность импульса 200 мксек., анод — сталь;
3 — длительность импульса 500 мксек., анод — сталь;
4 — длительность импульса 200 мксек., анод — медь;
d — диаметр лунки; h — глубина лунки.

мерная величина — $\tau_{зад.}/\tau_{и.}$. Легко видеть, что рост глубины лунки идет во времени медленнее, чем рост диаметра.

Эксперименты, проведенные для ряда других металлов, показали, что во всех случаях наблюдается запаздывание начала заметного выброса металла по отношению к импульсу тока.

Обсуждение результатов

Рассмотренные результаты экспериментального исследования с помощью скоростной съемки динамики формирования канала разряда, газового пузыря и лунки на электродах дают основания сделать ряд существенных заключений о механизме электрической эрозии металлов в импульсном разряде и подойти к теоретическому описанию динамики этого процесса с позиций теории теплопроводности.

Динамика процесса эрозии определяется перемещением во времени границы фазового превращения. В общем случае это перемещение границ расплавленного и испаренного металла, т. е. задача о трехфазной системе. В нашем случае с достаточной степенью точности [4, 5] можно ограничиться рассмотрением задачи о двухфазной системе.

Задача о перемещении границы фазового превращения (в частности, границы плавления) известна в математической физике как задача Стефана, которая решена для довольно общих начальных и граничных условий в предположении, что положение границы фазового превращения описывается уравнением типа $\xi = d\sqrt{t}$. Поскольку результаты рентгено-импульсной съемки показывают, что для нашего реального случая выполняется это условие, то решение задачи Стефана дает возможность описать

динамику процесса эрозии и тем самым создать основы количественной теории электрической эрозии в импульсном разряде.

Результаты скоростной съемки показывают, что силами, обеспечивающими выброс основной части металла из лунки, являются силы термического происхождения (газовыделение, силы сжатия при прохождении тепловой волны, термокапиллярные силы и др.), а не силы электрического происхождения — электромагнитные и электростатические пондеромоторные силы, как это предполагалось ранее. Силы электрического характера играют роль только в начальной фазе эрозии, когда из лунки выбрасывается около 20—30% металла, подвергающегося эрозии.

Пользуясь случаем, мы благодарим И. П. Коробову, К. Х. Гиоева и Ж. Е. Грязнову за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. А. Цукерман и А. И. Авдеев, ЖТФ, 12, № 4—5, 185, 1942.
- [2] W. Schaffs, Ergebnisse d. exakt. Naturwiss, 28, 1—46, 1954.
- [3] Э. М. Рейхрудель, Т. А. Гитова, Вестник МГУ, № 2, 1950.
- [4] Б. Н. Золотых. Физические основы электронской обработки. М., 1953.
- [5] Б. Н. Золотых. Сб. «Электронская обработка», 1, М., 1957.

Е. Г. ШАЕР

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП ДЛЯ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ МЕДИЦИНСКОЙ И АНТРОПОЛОГИЧЕСКОЙ ФОТОГРАФИИ

Фотография широко применяется в медицине для иллюстрирования историй болезней, докладов, научных работ и диссертаций. Нередко фотографии имеют значение для диагностики, например в тех случаях, когда необходимо своевременно обнаружить рост новообразования, свидетельствующий об его злокачественной природе. Однако значение фотографии для медицины не ограничивается областью диагностики. Ученые, работающие в различных отраслях естествознания, например минералогии, ботаники или энтомологии, создают коллекции изучаемых предметов. Возможности врача в этом отношении сужены, так как пациентов можно наблюдать только в течение ограниченного срока. По-видимому, фотография, особенно цветная и стереоскопическая, может до известной степени заполнить этот пробел, обеспечив получение и накопление точных и детальных изображений видимых патологических изменений при различных заболеваниях. Фотоснимки могут использоваться в качестве наглядных пособий при обучении, практически заменяя непосредственный показ больных. Важное значение имеет фотография для антропологов, так как документальные фотографии, выполненные в экспедиционных условиях, могут служить ценным материалом для внимательного исследования и классификации в лабораторной обстановке.

Выполнение многих видов медицинской и отчасти антропологической фотографии связано с техническими трудностями в тех случаях, когда необходимо получить изображения деталей строения живого организма, особенно при значительном увеличении. Вследствие невозможности обеспечить полную неподвижность объекта выдержка при съемках такого рода должна быть очень короткой: в зависимости от масштаба съемки она должна измеряться несколькими сотыми или даже тысячными долями секунды. Для обеспечения достаточной глубины резкости приходится применять, как правило, малые отверстия диафрагмы, поэтому освещенность объектов должна быть очень велика.

Лампы накаливания не всегда создают необходимую освещенность, а дуговые источники в большинстве случаев не обеспечивают достаточную стабильность освещения. Наиболее рационально освещать объект при фокусировке слабым светом, и только в момент съемки необходима мощная вспышка света. Использование для этой цели ламп-вспышек одного кратного действия нерационально вследствие необходимости смены лампы после каждого снимка. Наилучшим видом источника освещения для многих отраслей медицинской фотографии несомненно являются современные электронные импульсные лампы, которые обеспечивают многократное получение очень кратковременных мощных вспышек света.

Используя импульсные лампы для макрофотографии, мы не можем определить величину диафрагмы по известному методу ведущих чисел,

так как при сближении объекта и камеры должно учитываться влияние увеличения масштаба изображения и некоторые другие факторы.

Проделанные нами расчеты и эксперименты свидетельствуют о том, что при небольшом и среднем масштабе съемки необходимое возрастание освещенности с избытком обеспечивается приближением импульсной лампы к объекту. В тех случаях, когда масштаб съемки больше единицы, следует применять конденсор, установленный перед трубкой импульсной лампы, а при значительных увеличениях можно проектировать на объект с помощью оптической системы изображение участка поверхности лампы.

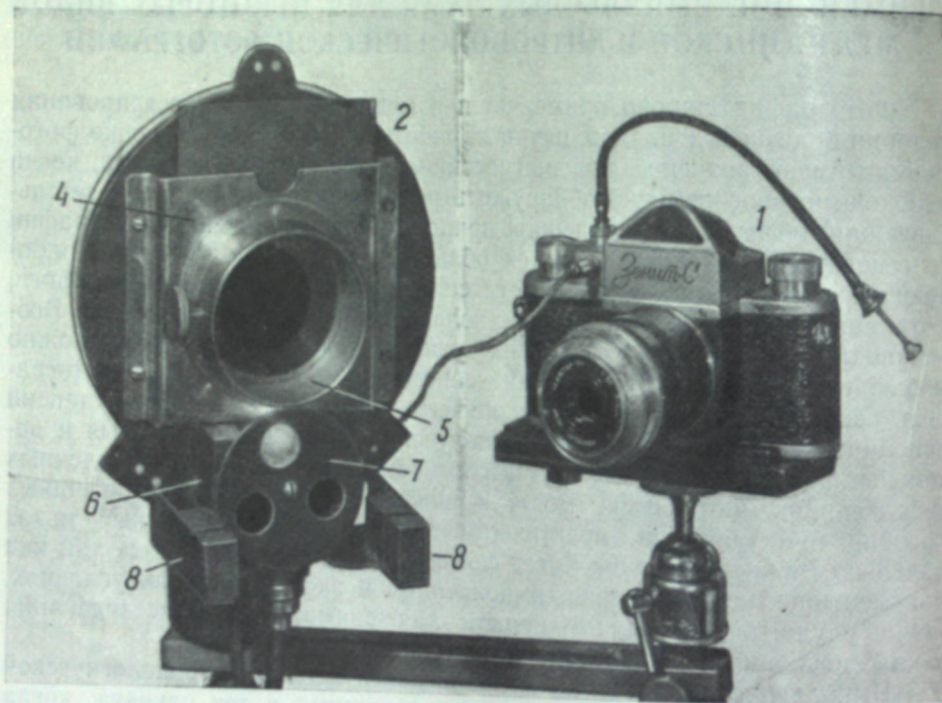


Рис. 1. Камера «Зенит» и импульсный осветитель ЭВ-1 со специальной приставкой для фотосъемки переднего отдела глаза.
1 — камера, 2 — осветитель, 3 — непрозрачный диск, 4 — паз для светофильтров, 5 — трубка для установки конденсора, 6 — вспомогательный осветитель, 7 — вращающийся диск, 8 — планки для установки поляризационного фильтра.

Перечисленные способы обеспечивают такую интенсивность освещения, что в большинстве случаев вполне возможна фотосъемка с применением оптимальных диафрагм даже на материалах, обладающих невысокой чувствительностью.

Для многих видов медицинской и антропологической фотографии наиболее рационально использовать распространенные малоформатные зеркальные камеры, которые удобны для выполнения макрофотографий и обычно снабжены синхронизаторами, рассчитанными на подключение импульсных ламп. Для черно-белой и цветной фотосъемки глаза человека и подопытных животных мы применили камеру «Зенит» и импульсный осветитель ЭВ-1, установленные на штативе от одного из офтальмологических приборов (рис. 1).

Для того чтобы обеспечить наилучшее воспроизведение деталей, нами была сконструирована специальная приставка, которая укрепляется на рефлекторе осветителя. Эта приставка состоит из непрозрачного диска

с отверстием, ограничивающим ширину пучка света импульсной лампы. В нижней части диска установлен вспомогательный осветитель с низковольтной лампочкой, служащей для освещения объекта при фокусировке. На приставке имеются пазы для укрепления различных светофильтров и конденсора. С помощью этой установки можно без затруднений получать, как черно-белые, так и цветные высококачественные снимки глаза.

Важным преимуществом импульсных ламп при съемке данного рода является то обстоятельство, что мгновенная вспышка не вызывает у пациента болезненного ослепления и устраняет возможность сдвига объекта во время экспозиции.

Стандартность освещения в отношении силы и спектрального состава света очень облегчает выполнение цветных фотоснимков. С помощью опи-

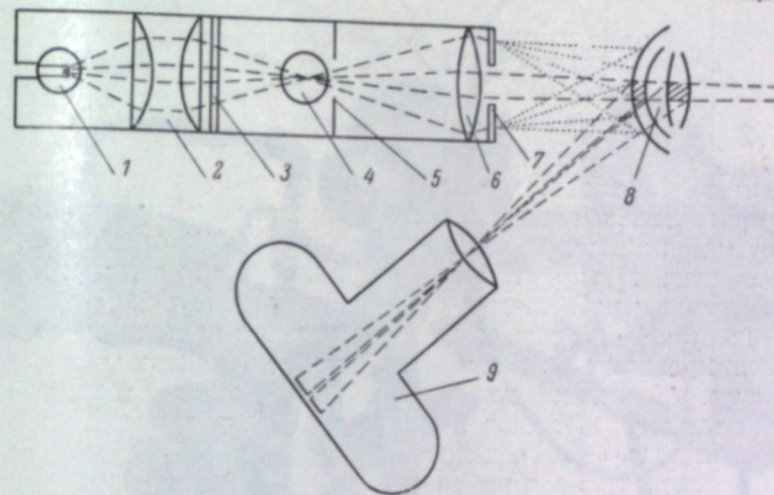


Рис. 2. Схема установки для фотографирования тонких деталей строения переднего отдела глаза.

1 — низковольтная лампочка, 2 — конденсор, 3 — матовое стекло, 4 — трубка импульсной лампы, 5 — щель, 6 — объектив, 7 — «диафрагма» из матовой пленки, 8 — глаз пациента, 9 — камера.

санной аппаратуры была выполнена серия цветных фотоснимков радужной оболочки нормальных глаз с целью выяснения возможности использования цветной фотографии в области антропологии.

Для достижения наиболее объективной, не зависящей от исполнителя цветопередачи, подбор коррекционных светофильтров при цветной печати производился по серой шкале, которая была сфотографирована в начале каждого заряда пленки. Затем все снимки глаз были отпечатаны с найденной комбинацией светофильтров и строго одинаковой выдержкой, без дополнительных проб. Цветопередача на этих снимках была весьма близка к натуре, а благодаря кратковременности выдержки оказалось возможным фотографировать без штатива, держа аппарат в руках, что удобно в экспедиционных условиях.

Некоторые детали строения глаза видны только при освещении узким пучком света. Для фотосъемки такого рода объектов нами сконструирована специальная установка, для которой использованы штатив от щелевой лампы, камера «Зенит» и импульсный осветитель ЭВ-1. Камера укреплена на месте снятого роговичного микроскопа, а осветитель смонтирована с нею при помощи кронштейна. На рефлекторе осветителя установлена специальная осветительная система (рис. 2). В этой системе лучи света низковольтной лампочки концентрируются конденсором, проходят через

матовое стекло, трубку импульсной лампы и щель, выделяющую узкий, равномерно освещенный прямоугольник. Изображение щели, ширина которой может изменяться, проектируется на объекте с помощью светосильного объектива, создавая достаточное для фокусировки освещение. В момент съемки импульсная лампа вспыхивает, изображение щели приобретает на мгновение очень большую яркость, выявляя тончайшие детали, которые воспроизводятся на снимке. Кроме деталей, видимых в области изображения щели, на снимке должны быть заметны общие контуры

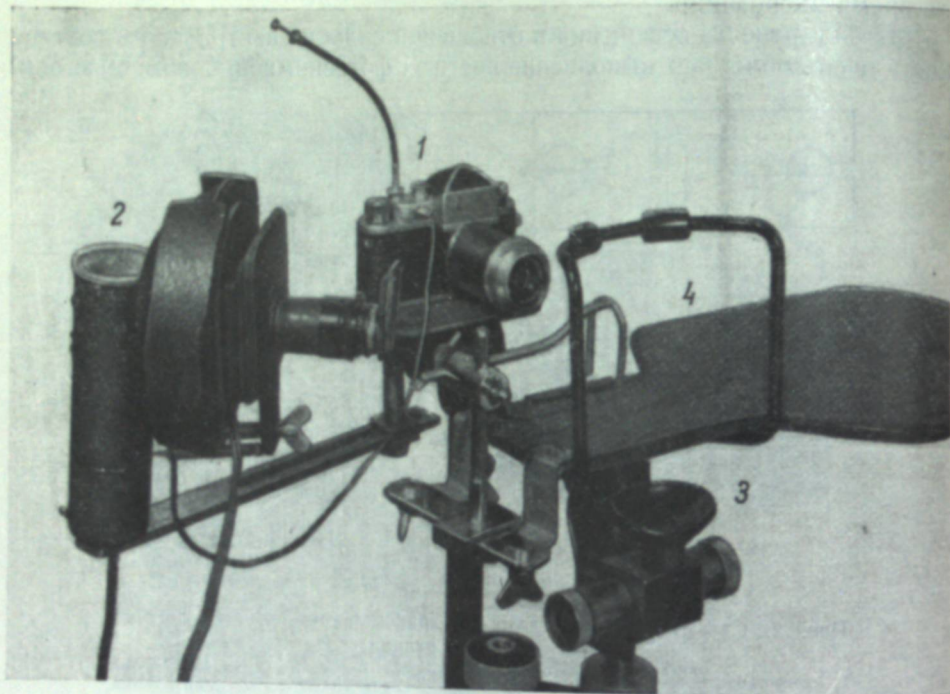


Рис. 3. Установка для фотографирования тонких деталей строения переднего отдела глаза.
1 — камера, 2 — осветитель, 3 — опора для головы пациента, 4 — площадка для подопытных животных.

глаза. Для этого на объективе осветителя установлена прямоугольная диафрагма, изготовленная из матовой пленки, которая рассеивает часть лучей и создает достаточное общее освещение. На штативе имеется опора для головы пациента, а при фотосъемке глаз подопытных животных на этой опоре устанавливается площадка с зажимом для головы животного (рис. 3).

Описанным способом нами были получены фотоснимки тонких деталей строения глаза: начальных форм катаракт, слабых помутнений роговицы, кровеносных сосудов, преципитатов и т. д. при увеличениях от 5 до 20 раз.

Фотосъемка с узкой щелью позволила выполнить фотоснимки оптических срезов роговицы и хрусталика, что доказывает возможность применения импульсных ламп для фотографического метода измерения кривизны преломляющих поверхностей оптической системы глаза.

С помощью данной установки были получены также фотоснимки капилляров в области ногтевого ложа при увеличениях от 20 до 40 раз.

Мгновенность съемки исключает возможность сдвига объекта, а интенсивность освещения вполне допускает применение в качестве негативного материала особо контрастной, мелкозернистой ортохроматической пленки «Микрат», обеспечивающей наилучшее качество снимков. Такого рода снимки представляют ценность при изучении некоторых заболеваний, в частности гипертонии.

Для стереофотосъемки глаза при небольшом увеличении нами сконструирована стереоприставка к камере «Зенит» с применением объектива

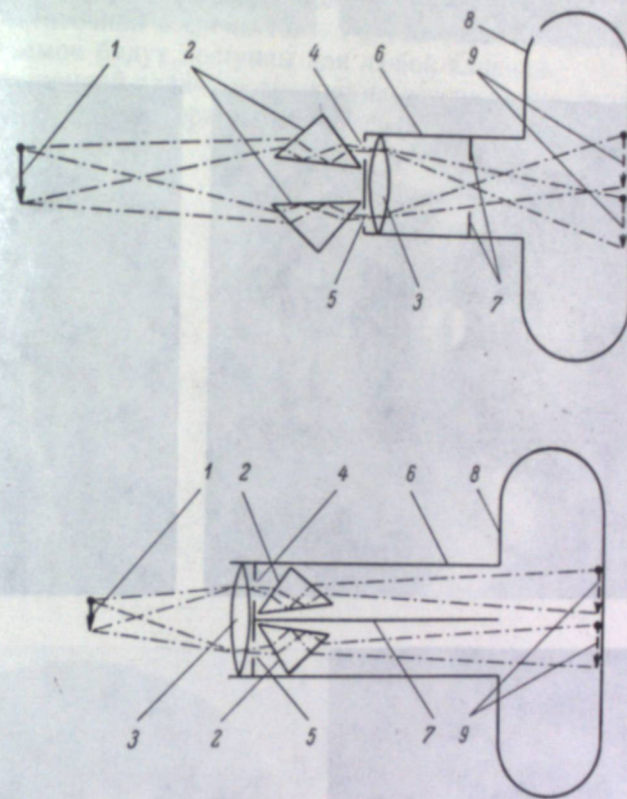


Рис. 4. Схемы стереоприставок.
1 — объект, 2 — призмы, 3 — объектив, 4 и 5 — диафрагмы, 6 — тубус, 7 — ограничитель кадров, 8 — корпус камеры, 9 — изображения.

«Юпитер-3». Она состоит из пластинки с двумя отверстиями, которые выделяют из правой и левой краевых зон объектива два участка, играющие роль двух самостоятельных объективов. Для того чтобы два изображения (стереопара) были правильно размещены в пределах кадра камеры, перед диафрагмами установлены две прямоугольные призмы, отклоняющие лучи на некоторый угол.

Второй вариант приставки, рассчитанный на получение несколько большего увеличения, отличается от описанного тем, что объектив повернут фронтальной линзой к камере, а диафрагмы и призмы находятся между объективом и камерой (рис. 4). Кроме того, сконструированная нами специальная стереокамера для фотосъемки глаза снабжена импульсным осветителем ЭВ-1 с описанной выше приставкой, в результате чего в связи с сокращением выдержки значительно возросла надежность ее работы.

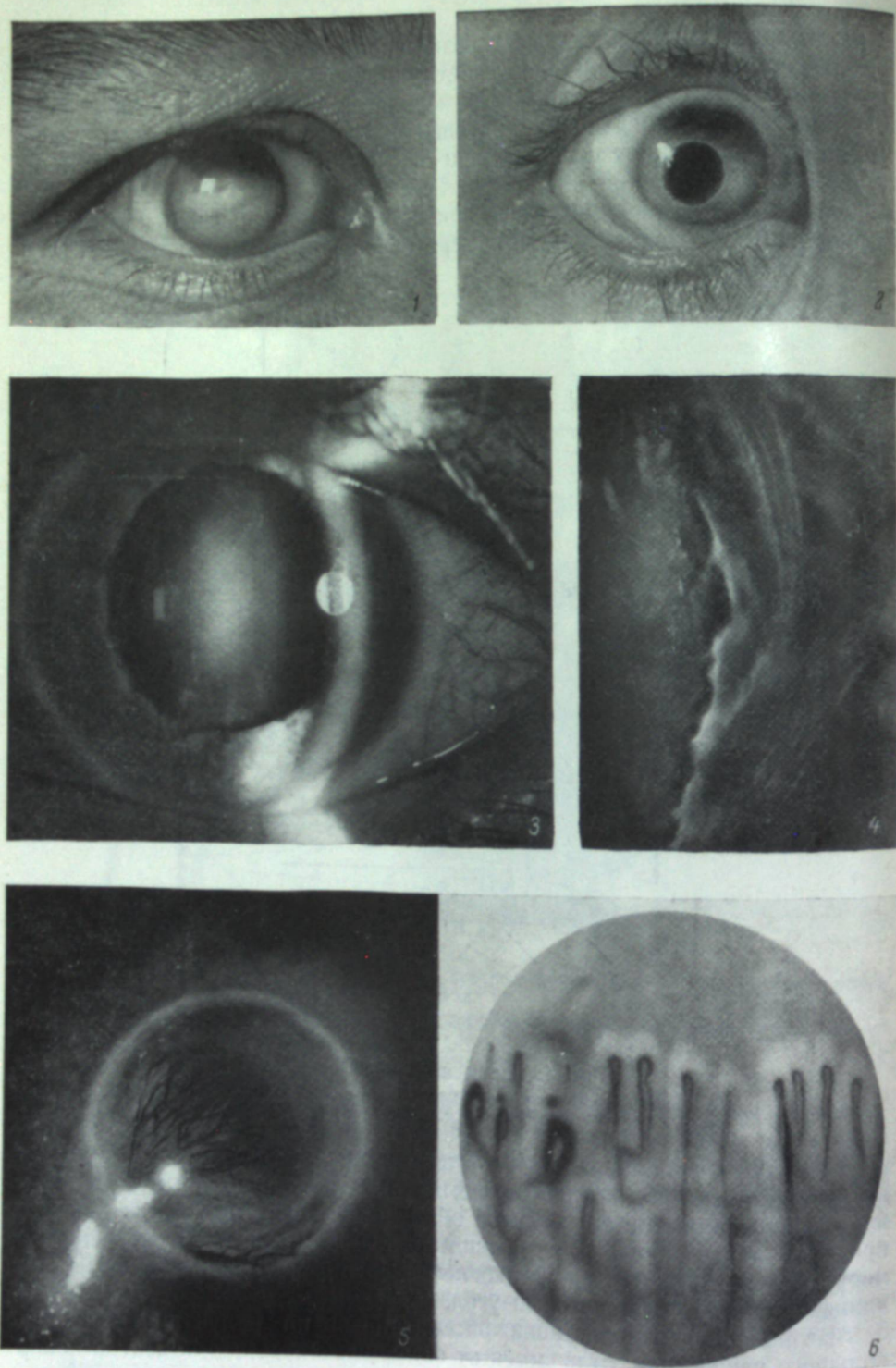


Рис. 5.

1 и 2 — глаз с бельмом до и после операции пересадки роговой оболочки, 3 — начальная катаракта, 4 — разрыв десцеметовой оболочки при кератоконусе, 5 — глаз кролика (кровоносные сосуды в трансплантате), 6 — капилляры в области ногтевого ложа.

Применение импульсных ламп и малоформатных зеркальных камер значительно упрощает фотосъемку этапов хирургических операций. Благодаря кратковременности экспозиции нами успешно производилась цветная фотосъемка в операционной без штатива. В этом случае фотографирует выбор точек зрения, соединенный с осветителем, в руках, что облегчает этап операции.

Образцы фотоснимков, выполненных описанными способами, представлены на рис. 5.

Возможности фотографии в области медицины могут быть использованы в достаточной степени только в том случае, если разнообразные виды фотосъемок будут доступны для любой клиники.

Решение данной задачи возможно на основе применения импульсных ламп, малоформатных зеркальных камер и некоторых дополнительных приспособлений.

К. Е. МОНАХОВ

АППАРАТУРА С ИМПУЛЬСНЫМ ИСТОЧНИКОМ СВЕТА

(Реферат доклада)

В соответствии с имеющимися импульсными источниками света и характером проводимых исследований были разработаны устройства двух типов:

а) устройства для наблюдения и фотографирования течения газа в аэродинамических трубах;

б) устройства для исследований работающих машин стробоскопическими методами.

Подобные устройства, как правило, состоят из 5 основных узлов: датчика синхронизации, устройств формирования синхронизирующих сигналов, генераторов поджигающих импульсов, блока питания импульсного источника света и собственно осветителя. В простейших случаях первые два элемента могут отсутствовать.

Помимо различия в светотехнических характеристиках разработанных устройств, каждому из них ставятся требования обеспечения определенной «жесткости» синхронизации и стабильности фазы вспышек импульсного источника света.

Установки второго типа, как правило, оборудуются релаксационным генератором с регулируемой частотой, позволяющим получить так называемый «эффект плывущей картины». Такой прием позволяет осуществить фотографирование, «эквивалентное» кино съемке с очень большим числом кадров в секунду.

При исследовании нестационарных газодинамических процессов (ударная волна, скачок уплотнения) и работающих машин (самолетный винт, рабочее колесо турбины и компрессора) существенное значение приобретает синхронизация изучаемого явления с вспышкой импульсного источника света в заданной или произвольной фазе их движения.

Разработанные датчики и устройства формирования синхронизирующих сигналов позволяют осуществить наблюдение и фотографирование явлений в области околосвуковых и сверхзвуковых скоростей движения. Дальнейшее совершенствование названных устройств должно базироваться на создании импульсных источников света с более совершенными светотехническими и эксплуатационными характеристиками.

Во время доклада демонстрировалась действующая стробоскопическая установка с импульсным источником света.

А. И. ХОХЛОВ

ПРИМЕНЕНИЕ СКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ С ИМПУЛЬСНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АЭРОДИНАМИКИ И ПРОЧНОСТИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

(Реферат доклада)

Методы высокоскоростной кино съемки широко применяются в экспериментальных исследованиях аэро-гидродинамики во всех случаях, когда съемка процесса не требует весьма кратковременного экспонирования кадров, например при исследовании обтекания моделей в потоке больших скоростей методом шелковинок, жидких пленок, химических покрытий, дымовых спектров и пр. Исследования методом кино съемки динамики быстропротекающих процессов при около- и сверхзвуковых скоростях потока требуют уже экспонирования кадров длительностью в доли микро-секунд ($10^{-7} \div 10^{-8}$ сек.), что осуществимо лишь при использовании импульсного источника света и синхронизации вспышек с работой кинокамеры.

Наличие таких источников света значительно расширяет область применения кинометрических методов при исследовании быстропротекающих процессов, в частности при исследовании вращающихся с большой скоростью объектов, пространственных скачков уплотнения и пр.

Разработана импульсная установка, включающая в себе мощный импульсный осветитель и синхронно работающую с ним кинокамеру при дистанционном управлении. Установка обеспечивает широкие возможности для визуальных и кинометрических исследований вращающихся объектов как в фиксированной позиции, так и в режиме «плывущей картины». Технические данные установки следующие:

- 1) максимальная мощность импульсной лампы 500 вт;
- 2) напряжения на главных электродах лампы $(2 \div 8) \cdot 10^3$ в;
- 3) частота вспышек $10 \div 100$ гц;
- 4) максимальная энергия единичной вспышки 450 дж.

В качестве съемочной камеры применяется кинокамера типа «Askapia». Синхронизатор кинокамеры обеспечивает в широком диапазоне уменьшение принимаемой частоты вспышек от осветителя до рабочих частот $10 \div 100$ гц в целях рационального использования мощности лампы при различной скорости съемки. Управление камерой и осветителем дистанционное. Частота съемки до 60 сек.^{-1} . Возможно применение синхронизатора с любой другой кинокамерой.

Разработана методика кино съемки вращающихся объектов при импульсном освещении.

Методом кино съемки при импульсном освещении проводятся исследования:

- 1) отрыва потока от лопастей винта методом шелковинок (визуализация картины срывного обтекания с помощью импульсной кино съемки)

спектра шелковинок на поверхности лопасти позволяет определять возникновение и развитие зон срыва потока, характер обтекания на критических оборотах, опасных по напряжениям и пр.; метод применим при испытаниях в боксе, в аэродинамической трубе и в натуральных условиях);

2) положения линии (точки) перехода на поверхности лопасти ламинарного течения в турбулентное, положения фронта скачка уплотнения методом каолинового покрытия, исследования турбулентности, пространственных скачков уплотнения и пр.;

3) явлений возникновения и протекания помпажа в плоскости рабочего колеса компрессора, деформаций лопаток;

4) обтекания потоком лопастей несущего винта методом шелковинок, определения деформации упругой линии лопасти и пр.;

5) деформаций изгиба и кручения лопастей винтов.

Получаемые результаты были проиллюстрированы фрагментами из киносъемок.

Развитие скоростной импульсной киносъемки и ее эффективное применение существенно зависит от наличия мощных импульсных источников света, способных работать в режиме высокой частоты вспышек (до $4\,000 \div 5\,000$ гц) при минимальной длительности вспышек порядка $10^{-7} \div 10^{-8}$ сек.

А. А. КУКИБНЫИ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОГО ПОЛЕТА ЗЕРЕН МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ

В ряде отраслей народного хозяйства применяются машины, которыми перебрасываются зерновые материалы на расстояние до 20 м. При полете зерна силами сопротивления воздуха очищаются от примесей, сортируются по крупности, просушиваются и охлаждаются.

Целью произведенных киносъемок являлось получение траектории движения любого зерна в пространстве и расположения траекторий по отношению друг к другу, длины пути и дальности бросания каждого зерна в отдельности, данных о времени полета каждого зерна на любом отрезке пути, поступательной скорости движения любого зерна, скорости вращения каждого зерна в отдельности относительно своего центра тяжести.

Опыты были поставлены на специально запроектированной и изготовленной установке, позволяющей изменять скорость бросания V_0 , угол бросания α_0 по отношению к горизонтальной плоскости, а также производительность — плотность зернового потока. В сочетании с применением различных зерновых культур это значительно расширило программу исследований.

Установка состоит из бункера, механизма бросания и испытательной камеры длиной 2 000 мм, шириной 500 мм, высотой 500 мм.

Киносъемки произведены высокоскоростным аппаратом СКС-1 отечественного производства.

В зависимости от светочувствительности наличной негативной киноплёнки применялся один из следующих методов освещения: переднее — при светочувствительности киноплёнки ДК-130 единиц ГОСТа или контурное — при светочувствительности киноплёнки МЗ 32-45 единиц ГОСТа. При переднем освещении потока зернового материала устанавливались приборы рассеянного света — по одному в начале и в конце участка съемки. Контурное освещение потока зернового материала осуществлялось дуговыми осветительными приборами, которые размещались за лабораторной установкой. Свет от них направлялся на белый экран. Киносъемка производилась на фоне отраженного света. Визирная сетка, необходимая для регистрации положений летящих зерен и установления масштаба изображения при покадровом просмотре кинофильма, получена натяжением шпагата по горизонтальным линиям с интервалом через каждые 50 мм и вертикальным — через каждые 100 мм.

В произведенных киносъемках частота съемок W_0 при скорости бросания $V_0 = 6$ м/сек. составляла $2\,000 - 3\,000$ сек.⁻¹, при скорости бросания $V_0 = 12$ м/сек. — $3\,000 - 4\,000$ сек.⁻¹. Просмотр снятых фильмов показал, что не следует увлекаться повышением частоты кадров, так как кадры фильма, снятого с очень высокой частотой, как правило, имеют несколько худшее фотографическое качество, чем кадры, снятые с меньшей частотой.

Брошенные зерна при скорости $V_0=6$ м/сек. летят на расстояние, примерно равное 2 м, а при $V_0=12$ м/сек. — до 11 м. Величина дальности бросания в сочетании с небольшими размерами зерен (3—12 мм) при производстве киносъемки сразу по всей длине их полета не позволяла получить четкое изображение летящих зерен. В связи со сказанным траектория полета зерен, брошенных со скоростью $V_0=6$ м/сек., была разбита на 4 участка (рис. 1): первый участок — у места сброса зерен с ленты механизма бросания, его длина от точки бросания составляла не более 250 мм; второй участок — восходящая ветвь траектории; третий уча-

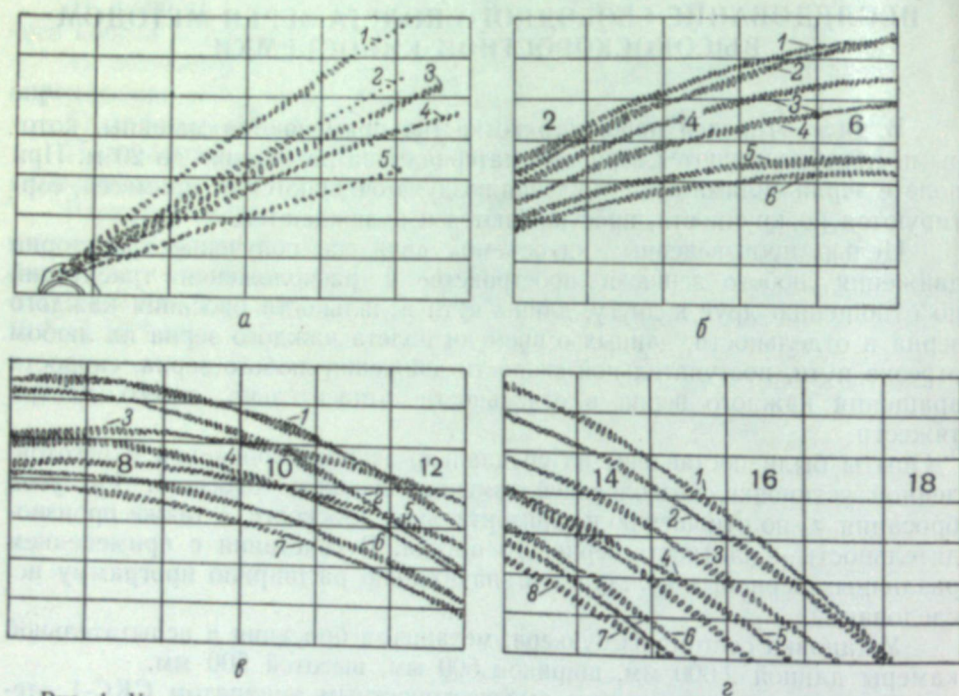


Рис. 1. Участки траекторий полета зерен овса, зафиксированные на карточках. а — начало полета, б — восходящая ветвь, в — середина траектории, г — нисходящая ветвь.

сток — середина траектории; четвертый участок — нисходящая ветвь траектории. Длина каждого из последних трех участков принималась равной 600—700 мм.

Разбивка траектории полета зерен по участкам была сохранена и при скорости бросания $V_0=12$ м/сек. Однако в этом случае киносъемка летящих зерен производилась только на первых трех участках, так как на последующих участках траектории изображения зерен на кинолентке сильно смазывались из-за значительного расширения зернового потока.

Киносъемочный аппарат устанавливался на расстоянии 3 200—3 700 мм от средней плоскости полета зерен. Кадры кинофильма, снятого с указанного расстояния, отнесены нами к съемкам средним планом. В пределах первого участка съемка полета зерен производилась также с расстояния 1 440 мм — крупным планом.

Полученный кинофильм изучался двумя методами: 1) кинопроекцией или качественным анализом и 2) покадровой кинопроекцией или количественным анализом. Для просмотра зрителями смонтировано несколько частей кинофильма из позитивных и негативных отрезков пленок. Изображения на экране с негативных пленок являются более четкими, чем с позитивных.

Метод количественного анализа положен в основу аналитической обработки снятого фильма полета зерен. Он позволил достаточно точно определить величины времени и пространства по отдельным кадрам. Отрезки времени устанавливались по отметкам времени, наносимым на пленку при съемке. Численные значения величин пространства (длина отрезка траектории, угол движения, угол поворота и т. д.) вычислялись по контурам каждого зерна, зафиксированным на специальной карточке при покадровом проецировании кинолентки через 3—5 кадров.

Кинематографический метод изучения свободного полета зерен позволяет: 1) объективно регистрировать движение зерен, 2) получать «мгновенные» значения поступательной и вращательной скоростей летящих зерен одновременно в разных точках потока зернового материала, 3) производить сглаживание «мгновенных» значений исследуемых величин по принятому пространственному отклонению и взятому интервалу времени, 4) не вводить в исследуемый поток никаких приборов и аппаратуры, нарушающих его структуру. Развивая кинематографический метод, возможно одновременно фотографировать полет зерен в двух плоскостях (измерение трех проекций траектории и скорости движения).

Одновременно с указанными преимуществами кинематографический метод обладает и существенными недостатками, а именно: 1) при сравнительной простоте эксперимента его обработка оказывается чрезвычайно сложной, кропотливой и длительной, 2) метод не дает возможности производить частотный анализ колебаний, 3) при скоростях бросания свыше 3 м/сек. снижается четкость изображения зерен при съемке во всей длине их полета из-за малости размеров последних и необходимости значительного удаления киносъемочного аппарата от плоскости съемки, 4) при скоростях бросания зерен свыше 12 м/сек. частота съемки $4\ 000$ сек.⁻¹ недостаточна — происходит смазывание изображений зерен.

Проведенными экспериментами установлено: 1) в момент вылета из бросковой машины зерна имеют различную скорость поступательного движения (скорость бросания) и неодинаковый угол бросания к горизонтальной плоскости, 2) большинство зерен движется с самовращением в среднем с частотой 1 200—1 500 мин.⁻¹, частота самовращения отдельных зерен доходила до 7 000 мин.⁻¹, 3) траектории полета зерен, одинаковых по форме, размерам, парусности и брошенных при неизменных начальных условиях, отличаются от траекторий, построенных на основании теоретических исследований с учетом сопротивления воздуха по квадрату скорости, 4) переброска зерновых материалов бросковыми машинами сопровождается разбрасыванием их по площади веяния, которое зависит от воздействия на компоненты зерновых материалов рабочего органа машины — до момента выброса их из машины и воздуха — после выброса их из машины.

Л. И. МАРКАРОВ

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ К ИЗУЧЕНИЮ ПРОЦЕССА МЕХАНИЗАЦИИ СБОРА ЧАЙНОГО ЛИСТА

(Реферат доклада)

1. Для механизации процесса сбора чайного листа необходимо создать такой уборочный аппарат, который обеспечивал бы высокую полноту сбора при хорошем качестве собранного материала.

Вопросы полноты сбора, а главное обеспечение качества при сборе непрерывно связаны с физико-механическими свойствами чайных побегов. Для изучения физико-механических свойств чайных побегов при воздействии на них динамических нагрузок, как это имеет место при механическом сборе, был применен метод электротензометрирования.

2. Метод электротензометрирования решил некоторые вопросы, но не позволил, однако, получить полную картину процесса изгиба и излома чайного побега при сборе.

Ввиду того что процесс излома побегов при сборе протекает в среднем за 0,01 сек., для изучения этого вопроса была применена высокоскоростная киносъемка.

3. В испытательную установку входили: специальный экспериментальный стенд, воспроизводящий процесс сбора, записывающая аппаратура (осциллограф), скоростная кинокамера СКС-1.

Работа с камерой СКС-1 показала, что при съемке с высокими частотами (2 000—2 500 сек.⁻¹) быстропротекающих, аperiодических процессов требуется большая практика для синхронизации действий камеры со снимаемым процессом. Однако, имея даже достаточную практику и пропустив через камеру полный заряд пленки (30 м), не всегда удается заснять этот процесс. Для полной гарантии того, чтобы процесс излома зафиксировался на пленке, а также с целью экономии рабочего времени и кино-фотоматериалов, было сконструировано и изготовлено специальное электромеханическое приспособление — синхронизатор, который автоматически замыкает необходимую электрическую цепь.

6. Для совместной расшифровки осциллограммы и фильма применялся метод увязки электротензометрирования со скоростной киносъемкой, заключающийся в одновременной подаче светового импульса на фильм и на пленку осциллографа.

7. Метод увязки электротензометрирования со скоростной киносъемкой раскрывает полную картину излома побега при сборе и дает возможность определить усилие в любой фазе изгиба и обеспечить взаимный контроль получаемых на осциллограмме и фильме результатов.

8. Установка СКС-1 на работающей непосредственно на чайной шпалере уборочной машине позволила заснять рабочий процесс механического сбора чайного листа.

Это раскрыло полную картину процесса сбора, дав возможность изучить режимы работы уборочных аппаратов.

А. М. РУШАЯЛО

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВХОДА ТЕЛА В ВОДУ

В 1955—1956 гг. группой студентов МГУ были выполнены две работы с применением скоростной киносъемки. Целью работ являлось получение и последующее обобщение экспериментального материала, относящегося к вопросу об ударе и скоростном входе тела в воду.

Гидродинамическая задача этого процесса не допускает точного математического решения ввиду нелинейности граничных условий. Не преодоленные в общем случае математические трудности устраняются в некоторых частных предельных задачах, одной из которых является задача удара о воду, решенная академиком Л. И. Седовым [1].

Кратковременность (менее 0,1 сек.) процесса погружения тела в воду делает невозможным его изучение визуальным способом. Скоростная киносъемка, замедляющая в 50—150 раз движение изображения на экране, позволяет наряду с построением количественных зависимостей сделать ряд качественных заключений.

Постановка эксперимента

При экспериментах использовался бак, изготовленный из органического стекла, размерами 500×500×1 200 мм.

Испытанию подвергались модели формы шара диаметром 10 мм и формы круглого цилиндра диаметром 30 и высотой 5 мм. Модели запускались катапультами. Для цилиндрических моделей была сконструирована латунная катапульта с пружинными шариковыми зажимами и поршнем. Использовать катапульту для придания моделям определенной начальной скорости не удалось, так как пружины поршня трудно поддавались тарировке и были нестабильны в работе, а неравномерность распределения удара по поверхности модели и трение на краях приводили к наклону последней при входе в воду. Катапульта укреплялась на массивном кронштейне, вместе с которым могла перемещаться вдоль деревянной опоры. Для последующей расшифровки в бак опускалась линейка из органического стекла с делениями через 5 мм.

Съемка проводилась кинокамерой СКС-1 стандартного типа. Частота съемки менялась в диапазоне от 1 200 до 3 500 кадров в секунду, в зависимости от скорости движения снимаемого на обмотки мотора камеры съемки достигалось изменением подающегося на обмотки мотора камеры напряжения, для чего употреблялся лабораторный автотрансформатор ЛАТР-1. На неоновую лампу отметчика времени подавался переменный ток сети.

Для освещения использовались два прожектора типа КПЛ-35 с лампами накаливания мощностью 5 квт. Вся съемка велась в рассеянном встречном свете, для чего на задней стенке бака закреплялся лист кальки. Оба прожектора размещались сзади, за баком.

Камера помещалась на уровне поверхности воды на расстоянии 1 200 или 3 500 мм от объекта съемки.

Синхронизация момента освобождения модели от зажимов катапульты с моментом включения кинокамеры проводилась подачей звукового сигнала. При этом учитывалось время свободного падения модели и время разгона киноплёнки в камере. Как правило, запаздывание пуска рассчитывалось так, чтобы плёнка не успевала набрать максимальную скорость до появления в кадре падающей модели. Это позволяло на 20—25 м фильма зафиксировать весь интересующий нас процесс. Для съёмок применялась плёнка типа ДН на негорючей основе.

В опытах с цилиндрическими телами не всегда удавалось добиться горизонтальности основания модели в момент ее соприкосновения с поверхностью воды. Однако сравнения измерений показали, что незначительный наклон модели не имеет существенного значения и им можно пренебречь.

Теория подобия и размерности, подробно разработанная и изложенная академиком Л. И. Седовым [2], позволяет характеризовать процесс быстрого погружения твердого тела в жидкость двумя безразмерными параметрами: коэффициентом масс $B = \frac{m}{\rho r^3}$ и числом Фруда $Fr = \frac{V_0}{\sqrt{gr}}$,

где m — масса погружающегося тела, V_0 — скорость тела у поверхности жидкости, r — характерный размер тела, ρ — плотность жидкости, g — ускорение силы тяжести.

Геометрически подобные тела при одинаковых параметрах B и Fr вызывают динамически подобные процессы. Этот закон позволяет производить опыты над небольшими моделями, а получаемые выводы переносить на геометрически подобные тела любых нужных размеров. Изменение параметров B и Fr в наших опытах осуществлялось путем изменения скорости V_0 и массы m .

Как уже указывалось выше, исследовавшиеся тела двигались со скоростью свободного падения, величина которой предварительно рассчитывалась по элементарной формуле $V_0 = k\sqrt{2gH}$, где g — ускорение земного притяжения, H — высота точки бросания над поверхностью воды, а k — поправочный коэффициент на сопротивление воздуха. Поправка k зависит от скорости и определяется весьма приближенно. В таких условиях наиболее точным методом определения скорости служат замеры по плёнке. Отметчик времени позволяет определить частоту съемки для любой группы кадров. Измерив путь, пройденный моделью над водой в поле зрения ряда кадров, можно было легко найти скорость движения модели перед погружением в воду. Определенная таким образом скорость значительно ближе к истинной, чем расчетная, однако и она колеблется в пределах точности определения частоты съемки и четкости изображения.

В ходе эксперимента испытывались модели, изготовленные из дерева, органического стекла, эбонита, алюминия, стали, свинца и алюминиевой оболочки, залитой свинцом. Сочетание свинца с алюминием (свиаль) позволило заполнить большой разрыв между коэффициентами B для моделей из алюминия и стали.

Выводы

В результате более пятидесяти проведенных съёмок получены для различных B зависимости глубины замыкания каверны и глубины тела в момент замыкания от числа Фруда и сделан ряд отдельных выводов.

Обозначим через H_k глубину, на которой замыкается каверна, а через H_r глубину нахождения тела в момент отрыва каверны. Отношение H_k/H_r резко убывает с возрастанием Fr . Таким образом, с увеличением числа Фруда происходит переход глубинного замыкания каверны в поверхностное.

Быстрый вход тела в воду вызывает всплеск. Всплеск может иметь вид короны с расходящимися в стороны краями или шатра, смыкающегося к центру.

При быстром погружении за телом образуется разреженное пространство. Под действием атмосферного давления в область с пониженным давлением устремляются потоки воздуха, которые и стягивают водяную плёнку всплеска в «шатер». Переход «коронообразного» всплеска в «шатрообразный» для моделей формы цилиндра с относительно малой образующей и плохой обтекаемостью, как установлено опытами, происходит при $2 < B < 3$.

Решающую роль в формообразовании всплеска играет градиент скорости погружения, который является функцией параметра B . Это делает вероятным предположение, что изменение формы всплеска не зависит от Fr и происходит при одном и том же критическом значении коэффициента B .

Полученные данные подтверждают эту гипотезу. Для полной ее проверки необходимо проверить область больших чисел Фруда.

Сужение каверны, образование шейки и отрыв каверны сопровождаются концентрацией в месте разрыва паскалевого давления. В следующий момент движения в центре водяной воронки возникает скоростная кумулятивная струя. Ее энергия настолько велика, что максимальная высота подъема струи может в четыре раза превысить высоту, с которой отпускалось тело, вызвавшее эту струю. Это явление, часто наблюдаемое в природе и быту, не нарушает закона сохранения количества движения, так как масса струи меньше массы падающего тела. Таким образом, высокий фонтан брызг, возникающий в месте падения тяжелого предмета в воду, является кумулятивной струей, а не всплеском, как часто представляется невооруженному глазу.

Скоростная киносъемка позволила раскрыть причину исчезновения кумулятивной струи для тяжелых моделей ($B > 3$) в случае, когда число Фруда превышает некоторое постоянное значение. В этом случае всплеск стягивается и засасывается внутрь каверны, преграждая путь кумулятивной струе. При столкновении энергия струи диссипируется и структура ее нарушается.

В случае прямого падения тела наблюдается асимметрическая картина быстро затухающих колебаний потенциальной энергии (высоты подъема) кумулятивной струи.

В ходе исследований был разрешен вопрос о влиянии смачиваемости на характер кавернообразования. По удельному весу дерево и органическое стекло незначительно отличаются друг от друга, тогда как смачиваемость дерева значительно выше смачиваемости органического стекла. Сравнения картины смывания каверны с деревянной и стеклянной поверхностей при движении с одинаковыми скоростями позволили заключить, что смачиваемость не оказывает заметного влияния на характер образования каверны и ее разрыв.

Резюмируем выводы. В результате экспериментального исследования выяснено:

1. Для каких значений параметра B , характеризующего массу тела, происходит переход всплеска от формы короны к форме шатра.

2. Почему при увеличении числа Фруда, характеризующего скорость проникания тела в воду, исчезает кумулятивная струя.

3. Методами сравнения выявлена степень влияния смачиваемости погружаемых тел на характер их погружения.

4. Из графиков $H-Fr$ выведена закономерность убывания H_k/H_T при возрастании числа Фруда (для цилиндрических моделей).

Кроме этого, в ходе описанных работ возник ряд весьма интересных вопросов, требующих для своего разрешения отдельной постановки экспериментов. Одним из них является вопрос о вибрации тела при ударе о несжимаемую жидкость. Изучение этой проблемы требует более высокого темпа съемки, чем та, которую допускает камера СКС-1.

В заключение пользуясь случаем выразить благодарность В. В. Розанцевой, под чьим руководством велись обе работы, а также В. Г. Пеллю и С. В. Рылло за ценные советы по освоению скоростной киносъемки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Л. И. Седов. Плоские задачи гидромеханики и аэродинамики. Гостехиздат, 1950.
[2] Л. И. Седов. Методы размерности и подобия в механике. Гостехиздат, 1952.

Л. О. МАКАРОВ

ПРИМЕНЕНИЕ СКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ ЖИДКОСТИ

(Реферат доклада)

Работа направлена на изучение механизма ультразвуковой очистки загрязненных поверхностей. С помощью камеры СКС-1 снимался процесс разрушения пятна загрязнения, нанесенного на поверхность стеклянной пластинки при облучении ее акустическим полем в воде. На частотах от 700 до 4 000 сек.⁻¹ удается отчетливо наблюдать поведение кавитационных пузырьков диаметром 0,1 мм и более. Графическая обработка результатов съемки производилась методом проектирования изображения на бумагу с последовательным совмещением неподвижных объектов и регистрацией положения интересующих нас движущихся точек.

Съемка дала серьезные научные результаты, доложенные на II Международном акустическом конгрессе, происходившем в США в июне 1956 г.

В процессе съемок выявились некоторые недостатки камеры СКС-1. Серьезную трудность при съемке, особенно на максимальных скоростях, представляет создание удовлетворительной системы мощного сосредоточенного освещения.

С. В. БУХМАН

ПРИМЕНЕНИЕ СКОРОСТНОЙ ФОТОКИНОСЪЕМКИ В ИССЛЕДОВАНИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

(Реферат доклада)

Применение фотографических методов исследования к процессам горения дало возможность измерить температуру движущихся горящих угольных пылинок.

Сущность метода измерения заключается в следующем. Горящая частица фотографируется через два различных светофильтра — красный и зеленый. На эту же пленку фотографируется градуировочное тело, нагретое до определенной измеренной другим методом температуры. Сравнение плотностей почернения на снимках градуировочного тела и частиц позволяет определить их температуру.

Применение съемки на неподвижную пленку при прерывистом освещении дало возможность исследовать процесс распада капли в воздушной струе и измерить скорость пылинок в пылевоздушной струе.

Распад капли в воздушной струе был проиллюстрирован кинофильмом, снятым скоростной кинокамерой СКС-1.

Применение скоростной кинематографии позволило с большой степенью точности ($1,3 \div 1,5\%$) измерить время сгорания угольных пылинок.

В дальнейшем предполагается применение скоростной микрокинематографии для изучения процесса воспламенения угольной пылинки и применение скоростной кинематографии для изучения струйных движений.

Г. Г. ТРЕЩЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО КИПЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ

(Реферат доклада)

Поверхностное кипение возникает в потоке жидкости, недогретой до температуры насыщения и омывающей поверхность нагретого тела. Такой процесс возникает в ряде аппаратов, и в том числе в атомном реакторе.

При поверхностном кипении могут быть достигнуты тепловые напряжения в несколько миллионов ккал/м² · час. Исследование этого процесса имеет большое техническое и научное значение. Как показали исследования обычного кипения, метод кино съемки дает в таких случаях весьма полную и точную картину явления.

Процесс поверхностного кипения обладает рядом особенностей, которые определяют условия кино съемки в этом случае. Прежде всего при поверхностном кипении размер образующихся паровых пузырей весьма мал — он составляет десятые доли миллиметра.

Далее время существования пузыря измеряется десятками долями миллисекунд. Наконец, объект съемки — процесс кипения — имеет статистическую природу.

Исследование поверхностного кипения производилось с помощью скоростного щелевого киноаппарата AEG, позволяющего производить съемку с частотой 15 000 сек.⁻¹.

Кипение воды происходило в канале прямоугольного сечения. В нижнюю сторону канала была вмонтирована никелевая лента, через которую пропускался постоянный ток и которая служила нагревателем. В боковых стенках канала сделаны окна из стекла. Съемка производилась в проходящем свете. Источником света служила ртутная лампа СВДШ-250, от которой свет направлялся конденсором на область кипения. Объектив киноаппарата имел фокусное расстояние 75 мм и относительное отверстие 1 : 1,8. Съемка производилась с увеличением 2^x на пленку типа А. С пленок делались отпечатки с увеличением 5^x, по которым и производились все измерения. Процесс поверхностного кипения был исследован при следующих режимах: при давлении от 1,5 до 11 ата, при температуре от 50 до 160° С, при тепловых нагрузках от 10⁶ до 5 · 10⁶ ккал/м² · час и при скоростях потока 2 и 4 м/сек.

Рассматривая типичную картину образования пузырей при поверхностном кипении, мы видим, что пузырьки пара движутся вместе с потоком и одновременно растут или уменьшаются, вследствие этого их изображения имеют несколько искаженную форму (сказывается щелевой затвор). Это искажение не превышает 15% и может быть учтено. Вначале роста

пузыри имеют форму полушара. Пузыри движутся не только вдоль потока, но и испытывают некоторое смещение в поперечном направлении.

Смещение пузыря из оптически сопряженной плоскости сравнимо с величиной глубины резкости объектива при таких макрорезках. Это требует особенно тщательной установки апертурной диафрагмы для обеспечения нужной глубины резкости.

Кипение является статистическим процессом; каждая из величин, характеризующая процесс, изменяется во времени, а также изменяется от одного участка поверхности нагревательного элемента к другому. Например, размеры пузырей образуют совокупность значений со значительной дисперсией.

В результате большого количества измерений получено распределение диаметра и периодов образования пузырей; оба распределения оказались гамма-распределением. Они несимметричны относительно максимума, что весьма существенно для подсчетов, связанных с выяснением механизма теплообмена, ибо средние значения величин при такой несимметрии не совпадают с наиболее часто встречающимися.

С получением средних значений размеров пузырей, частот их образования и числа центров парообразования было найдено, что тепло, заключенное в жидкости, вытолкнутой пузырями из пограничного кипящего слоя в холодное ядро потока, равно общей теплоотдаче, которая независимо определялась обычными при исследовании теплоотдачи методами. Действие паровых пузырей сводится, с одной стороны, к перемещению перегретой жидкости из пограничного слоя в ядро потока, а с другой — к турбулизации пограничного слоя.

Метод кино съемки поверхностного кипения позволяет установить физическую картину процессов, найти нужные для техники способы расчета теплообмена.

Перед исследователями стоит задача изучения поверхностного кипения при более высоком давлении. С точки зрения кино съемки для этого предстоит преодолеть весьма существенные трудности, которые заключаются в следующем. Размер пузырей с давлением уменьшается, так что надлежит вести съемку с достаточно большими для макросъемок увеличениями (до 10^4). Поскольку объективы киноаппаратов не коррегированы для условий макросъемок, то можно ожидать заметных искажений изображений; было бы необходимо для этой цели разработать соответствующую оптику. Частота съемки $15\,000\text{ сек.}^{-1}$ для исследования всех случаев поверхностного кипения недостаточна; необходимо иметь аппаратуру, позволяющую снимать с частотой до 10^6 сек.^{-1} .

Б. В. КУБЕЕВ

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СЪЕМКИ В ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ

(Реферат доклада)

Специальные методы кино- и фотосъемок находят все более широкое применение в научно-исследовательских работах профессорско-преподавательского состава, аспирантуры и студенчества наших высших учебных заведений. Ряд специальных кино съемок используется научными работниками в своих диссертациях.

Центральная кинолаборатория является одной из первых в СССР лабораторий, освоившей и широко внедрившей в практику научно-исследовательской работы высокоскоростную кино съемку.

Лаборатория проводит для целей научно-исследовательской работы специальные виды кино съемок, изготавливает из материалов научно-исследовательских кино съемок учебные кинофильмы, организует массовое тиражирование и передает учебные фильмы в собственность высшим учебным заведениям, производит лабораторную обработку кино пленки и малотиражную печать учебных кино пособий и научно-исследовательских документаций для высших учебных заведений, обобщает и систематизирует опыт по применению кино в вузах, организует выпуск литературы по учебному и научному кино и заказывает учебные фильмы киностудиям Министерства культуры СССР.

За период с 1950 г. лабораторией проведено свыше 100 научно-исследовательских съемок в самых разнообразных областях науки и техники.

В 1956 г. лаборатория втрое увеличила объем работ по научно-исследовательским кино съемкам. Были выполнены сложные высокочастотные кино съемки по следующим темам: «Исследование процесса образования резьбы методом пластической деформации», «Исследование температурных полей двигателей внутреннего сгорания», «Процесс резания неметаллических материалов», «Исследование процессов уплотнения формовочной смеси вибропрессованием» и многим другим.

Придавая большое значение совместной работе с промышленностью и отраслевыми институтами, лаборатория в 1956 г. провела совместно с ними ряд научно-исследовательских кино съемок: «Исследование причин появления заусенцев при обработке деталей часов» (для часовой промышленности), «Изучение гидродинамических явлений при выпуске и разливе стали» (для металлургической промышленности), «Процесс высева семян различными высевающими аппаратами» (для сельского хозяйства); «Исследование движения сыпучих материалов при пневмотранспорте» (для пищевой промышленности) и ряд других.

Кинолаборатория непрерывно расширяет арсенал средств и методов научно-исследовательских съемок.

Важным направлением в работе лаборатории является научная, техническая и организационная помощь, оказываемая лабораториям вузов, отраслевым институтам и промышленным предприятиям в налаживании научно-исследовательских киносъемок. Можно назвать около двух десятков организаций, в которых с помощью центральной лаборатории организованы небольшие кинолаборатории или съемочные группы.

Методическое управление выпустило в свет два коротких аннотированных справочника «Научная фото- и кинодокументация, выполненная в вузах в 1948—1952 гг.» и ряд аннотированных каталогов учебных фильмов, научных фото- и кинодокументаций. Предполагается в порядке обмена опытом выпуск более подробного справочника по научно-исследовательским кинодокументациям, снятыми вузами, где будет детально описана та или иная специальная киносъемка; особое внимание будет уделено изложению методов скоростной киносъемки, а также описанию аппаратуры и т. д.

Некоторые исследовательские работы являются основой для создания учебных наглядных пособий для вузов, как например: «Исследование влияния формы передней грани резца на процесс стружкообразования», «Процесс стружкообразования при резании металлов» и др.

На совещании был показан кинофильм с различными включенными в него научно-исследовательскими работами, выполненными работниками вузов с применением специальных киносъемок, как например: научно-исследовательская работа «Исследование процесса смесеобразования в вихрекамерных дизелях», выполненная Центральной кинолабораторией под руководством Д. Н. Вырубова. Данная научно-исследовательская киносъемка позволила получить количественные зависимости, связывающие качество смесеобразования с конструктивными размерами камеры сгорания, а также с изменением режима работы двигателя внутреннего сгорания. Удалось выявить характер движения задымленного воздуха в вихревой камере. Полученные результаты киносъемки помогли уточнить методику расчета вихревых камер сгорания дизелей.

Лабораторией под руководством Г. П. Савельева выполнена научно-исследовательская работа «Разрыв струи жидкого металла при разливе и выпуске». Киносъемка производилась со скоростями 3 800—4 000 кадров в секунду. Скоростная съемка позволила зафиксировать на киноплентку процессы, происходящие в струе при литье в производственных условиях. Данная научно-исследовательская киносъемка в настоящий момент еще полностью не закончена, но имеющийся материал уже дает возможность сделать выводы и понять сущность изменения состава металла при разливе его в формы.

Научно-исследовательская работа «Универсальный загрузочный бункер» выполнена под руководством Е. Я. Финкеля. Киносъемки проведены камерой СКС-1 со скоростями 600—800 кадров в секунду. Данная киносъемка позволила проследить процесс ориентации деталей в загрузочном бункере и установить размеры загрузочных барабанов. Загрузочные бункера находят широкое применение для питания автоматических линий в поточном производстве всяких крепежных деталей, в часовом производстве для ориентации мелких деталей.

Научно-исследовательская работа «Изучение действия ультразвука на поверхности» выполнена под руководством А. Т. Косолапова. Съемка производилась камерой СКС-1 со скоростями от 800 до 1 500 кадров в секунду. Данная киносъемка позволила глубже проникнуть в механизм процесса дегазации жидкостей под действием ультразвука и механизм ультразвуковой очистки загрязненных деталей. Получены новые сведения

о поведении пузырьков в жидкости при ее озвучивании ультразвуком.

Научно-исследовательская работа «Процесс работы инструментов с различной конфигурацией» выполнена при научной консультации А. Э. Грубе и И. И. Шейнова. Киносъемка производилась камерой «Гранд-Витесс» с частотой 240 кадров в секунду. Данная киносъемка помогла проследить быстропротекающий процесс и оказала большую помощь в регулировке режущих инструментов деревообрабатывающих станков.

Научно-исследовательская работа «Пропуск лесоматериалов по вихревой воронке» выполнена под руководством Б. Ю. Калиновича. Киносъемка осуществлялась со скоростью 240 кадров в секунду на макете с прозрачной передней стенкой. В результате удалось доказать безопасность пропуска лесоматериалов через гидроузлы (плотины), а также использовать вихревые воронки для пропуска через донные отверстия древесины, шуги и других плавающих наносов, что имеет большое народнохозяйственное значение, особенно в связи со строительством электростанций на северных реках.

Научно-исследовательская работа «Переход жидкого металла при электросварке» выполнена лабораторией под руководством Я. Л. Клячкина. Съемка производилась высокоскоростной кинокамерой СКС-1 с частотами съемки 4 500—5 000 кадров в секунду. При киносъемке применялись темно-красные светофильтры, поглощавшие часть спектра сварочной дуги. Подсветка электрода и сварочного шва осуществлялась мощным специальным дуговым осветителем. При помощи высокочастотной киносъемки изучалось влияние на процесс электросварки рецептуры обмазки электрода, силы тока, напряжения и полярности тока. Данная киносъемка позволила выявить явления, происходящие при электросварке, а также разработать технологию электросварки некоторых специальных сплавов.

А. А. САХАРОВ

ТЕРМИНОЛОГИЯ В ОБЛАСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ФОТОГРАФИИ И КИНЕМАТОГРАФИИ

В настоящее время в Советском Союзе практически используются и находятся в разработке разнообразные системы и способы высокоскоростной съемки, предназначенные для различных целей и областей применения.

В процессе конструирования, изготовления и внедрения высокоскоростной съемочной аппаратуры, в процессе практического использования высокоскоростной съемки общается обширный круг специалистов, представляющих различные отрасли науки, техники и промышленности. В этих условиях исключительно важное значение приобретает вопрос установления единой технической терминологии, специфической для высокоскоростной фотографии и кинематографии.

Разработка терминологических нормалей или стандартов в области высокоскоростной фотографии и кинематографии может быть осуществлена лишь на базе определенной системы классификации способов высокоскоростной фото- киносъемки и соответствующей аппаратуры. При разработке терминологической нормали должна быть учтена связь отечественной специальной терминологии с иностранной и использованы соответствующие иностранные источники.

Первым этапом разработки единой терминологии по высокоскоростной фотографии и кинематографии явилось составление проекта словника объемом около 150 терминов, содержание которого разбито на следующие разделы:

1. Виды высокоскоростной киносъемки (по диапазонам скоростей съемки).
2. Способы высокоскоростной съемки (в зависимости от техники осуществления).
3. Аппаратура для высокоскоростной съемки.
4. Специальные элементы съемочной аппаратуры и оборудования для высокоскоростной съемки.
5. Процесс высокоскоростной съемки.
6. Оптическое и фотографическое изображение при высокоскоростной съемке.
7. Изучение и расшифровка результатов высокоскоростной съемки.

При выборе терминов, подлежащих включению в окончательный проект терминологической нормали, и формулировке их определений предполагается использовать приводимые в табл. 1 и 2 классификационные схемы по 2-му и 6-му разделам.

В первой из них (табл. 1) дана классификация основных способов высокоскоростной съемки в зависимости от принципа фотографической

Таблица 1

Способы высокоскоростной съемки	Способ экспонирования	Способ съемки
Принцип фотографической фиксации		
I. Прерывистая фиксация изображения, неподвижного относительно светочувствительного материала: 1) при прерывистом движении светочувствительного материала 2) при неподвижном светочувствительном материале	Механический. Механический. Электрический. Электробооптический. Электронно-оптический.	Съемка на прерывисто-движущуюся пленку. Хронофотография. Съемка «щелевым» аппаратом. Съемка с импульсным освещением. Съемка с электронно-оптическим преобразованием изображения.
II. Прерывистая фиксация изображения при относительном смещении изображения и светочувствительного материала III. Непрерывная фиксация изображения при относительном смещении изображения и светочувствительного материала: 1) фиксация изображения, ограниченного узкой щелью 2) фиксация диссектированного изображения с регруппировкой его элементов 3) фиксация растрового изображения	Механический. Оптико-механический. Электронно-оптический. Оптико-механический. Механический. Оптико-механический. Электронно-оптический. Электронно-оптический.	Съемка с механической разверткой. Съемка с оптической разверткой. Съемка с электронно-оптической разверткой. Съемка с диссектированием изображения. Растровый способ съемки. Съемка по способу оптической компенсации.
IV. Периодическая фиксация изображений, движущихся синхронно со светочувствительным материалом V. Последовательная фиксация изображений, образующих при помощи ряда идентичных объективов или множительной оптической системы: 1) при неподвижном светочувствительном материале 2) при относительном смещении изображения и светочувствительного материала	Механический. Электрический. Электробооптический. Оптико-механический. Оптико-механический.	Съемка по способу «коммутации» изображений: а) съемка при помощи первичной многообъективной системы; б) съемка при помощи вторичной многообъективной системы или множительной оптики.

фиксации и технических средств, при помощи которых производится экспонирование последовательных кадров. В таблице указаны пять принципов фотографической фиксации, определяющих собой различные пути технического осуществления высокоскоростной съемки. Способы экспонирования последовательных кадров разбиты в соответствии с характером используемых технических средств на шесть групп: оптические, механические, оптико-механические, электрические, электрооптические и электронно-оптические.

Таблица 2

Изображение, получаемое при высокоскоростной съемке

Способ съемки	Род фиксируемого изображения	Экспонирование отдельных участков изображения	Получаемое изображение
1. Съемка на прерывисто-движущуюся пленку	Первичное	Последовательное	Интегральное
2. Съемка «щелевыми» аппаратами	"	"	
3. Съемка с импульсным освещением	"	Одновременное	Развернутое
4. Съемка с механической разверткой	"	—	
5. Съемка с оптической разверткой	Вторичное	—	Дискретное с разверткой элементов
6. Съемка с электронно-оптической разверткой	"	—	
7. Съемка с диссектированием изображения	"	Одновременное	Интегральное
8. Растровый способ съемки: а) с механической разверткой	Первичное	"	
б) с оптической разверткой	Вторичное	"	
9. Съемка по способу оптической компенсации	Первичное	Последовательное	Интегральное
10. Съемка по способу «коммутации» изображений: а) съемка при помощи первичной многообъективной системы	Первичное	Одновременное	
б) съемка при помощи вторичной многообъективной системы или множительной оптики	Вторичное	"	

Во второй схеме (табл. 2) представлена классификация типов фотографических изображений, получаемых при съеме указанными в табл. 1 способами высокоскоростной съемки. Эта классификация охватывает основные типы изображений, получаемых при высокоскоростной съемке: интегральное, развернутое и дискретное с разверткой элементов.

И. А. ЧЕРНЫИ

3-И МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС ПО ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ФОТОГРАФИИ

(Реферат доклада)

Международные конгрессы по высокоскоростной фотографии и кинематографии учреждены в 1952 г. Международным комитетом по высокоскоростной фотографии. Согласно принятому решению, конгрессы созываются каждые два года.

Третий конгресс происходил 10—15 сентября 1956 г. в Лондоне, где он был организован правительственным учреждением — департаментом научных и промышленных исследований. Присутствовало свыше 300 делегатов от 18 стран. Делегация Советского Союза, состоявшая из трех представителей, к сожалению, не принимала участия в его работе, так как прибыла в Лондон лишь после закрытия конгресса из-за слишком поздней выдачи виз английским посольством в СССР. Около половины делегатов составляли англичане, однако были обширно представлены другие страны, в которых широко ведутся работы по скоростной съемке: США, Франция и ФРГ направили по 15—30 делегатов.

Согласно принятому распорядку, доклады на заседаниях не зачитывались, а лишь обсуждались на основе ранее распределенных подробных текстов. Это позволило рассмотреть за пять дней работы свыше 60 докладов, распределенных по тематике на 16 секций.

Две трети докладов были посвящены интересам военного дела и применению скоростных съемок для исследования различных видов вооружений — от атомного и воздушного до артиллерийского и подводного.

Труды конгресса выпущены из печати в начале 1957 г. в виде хорошо оформленного тома объемом свыше 300 страниц.

К работе конгресса была приурочена выставка, на которой, помимо небольшого исторического раздела, демонстрировалось около 50 экспонатов приборов и установок, из которых многие впервые оказались доступными для широкого обозрения.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Акад. А. А. Лебедев. Вступительное слово	5
Источники света	
В. Г. Пелль. Источники света непрерывного свечения для высокоскоростной киносъемки	7
Д. А. Гоухберг. Спектральные, световые и электрические характеристики ксеноновых дуговых ламп и возможные области их применения	14
И. С. Маршак. Физический механизм разряда в трубчатых импульсных лампах и пределы нагрузки этих ламп	16
К. С. Вульфсон и Ф. А. Чарная. Исследование яркости канала импульсного разряда	27
М. П. Ванюков и А. А. Мак. Яркость некоторых импульсных источников света	31
Б. М. Водоватов и М. И. Элштейн. Спектральные характеристики трубчатых импульсных ламп	35
И. С. Маршак, В. И. Васильев, А. И. Миронова, В. П. Иванов и Р. Г. Вдовченко. Новые импульсные лампы	43
М. П. Ванюков, А. Ф. Добрецов, В. И. Исаенко и А. А. Мак. Мощный импульсный источник света	53
Н. Н. Огурцова и И. В. Подмошенский. Источник света для скоростной кинокамеры	58
В. П. Иванов, А. Л. Вассерман, А. А. Букарева и В. П. Жильцов. Схема питания импульсных ламп в режиме часто повторяющихся вспышек	62
М. Г. Фейгенбаум. О применении аккумуляторов для питания импульсных ламп	64
И. М. Гуревич. Градуировка интенсивности световых импульсов методом электронной модуляции приемников излучения и импульсный фотометр УИФ-1	68
Ю. М. Кутев. Новая модель импульсного свечемера	70
Г. М. Грачева, Л. Н. Закгейм и В. Ф. Сафонов. Электролитические конденсаторы для установок импульсного освещения	72
К. Е. Медведев. Импульсные высоковольтные керамические конденсаторы	75
Приборы и аппаратура для высокоскоростной съемки	
М. М. Бутслов. Электронно-оптические преобразователи для изучения сверхбыстрых процессов	76
М. М. Бутслов, Е. К. Завойский, А. Г. Плахов, Г. Е. Смолкин, С. Д. Фанченко. Электронно-оптический метод фотографирования сверхбыстрых процессов	84
В. А. Симонов и Г. П. Кутуков. Электрическая схема для высокоскоростной покадровой фотосъемки импульсных разрядов с помощью электронно-оптических преобразователей	90
П. В. Кевлишвили. Применение элементов электроники в аппаратуре для высокоскоростной фотографии	91
Г. Л. Ширман. Некоторые вопросы развития луп времени и фотохронографов с зеркальной разверткой	93
А. С. Дубовик. Некоторые вопросы теории зеркальной развертки	102
Л. В. Васильев, Е. А. Тарантов. Об эффективном времени светового импульса	113
С. Н. Сидоров. Малогабаритный турбинный двигатель для высокоскоростных фоторегистрирующих устройств	116

Л. А. Самуров. Оптические ускорители и новая схема сверхскоростной кинокамеры	121
В. Б. Ликоренко. Сверхскоростная фоторегистрирующая установка СФР	131
И. И. Крыжановский. Сверхскоростная киносъемочная камера с частотой съемки до 200 000 кадров в секунду	139
С. В. Рылло. Расширение эксплуатационных возможностей киносъемочного аппарата СКС-1	141
О. Ф. Гребенников. Растровый метод скоростной киносъемки	145
Л. В. Акимакина. Пути практического изготовления оптических растровых решеток для высокоскоростной съемки	152
А. И. Салищев. Искровые установки для высокоскоростного фотографирования на неподвижную фотопленку	155

Светочувствительные материалы

Ю. Н. Гороховский. Фотографические материалы для высокоскоростной фотографии и кинематографии	172
---	-----

Применения высокоскоростной съемки

Н. И. Рынденков. Применение высокоскоростной киносъемки для исследования процессов обработки деталей точных приборов	173
С. П. Тамбовцев. Исследование процесса резания металлов методом высокоскоростной микрокиносъемки	174
С. Р. Жуковский и В. К. Переверзев. Исследование процесса образования металлизационного покрытия методом скоростной киносъемки	175
А. Н. Ханукаев. Исследование механизма разрушения стержней под действием ударной волны с помощью скоростной киносъемки	180
Л. П. Северин. Некоторые результаты исследований гидромониторных струй методом скоростной киносъемки	183
Б. Н. Золотых и А. И. Круглов. Скоростная съемка импульсного разряда в жидкой диэлектрической среде с помощью камер СКС-1 и СФР, а также в рентгеновских лучах применительно к исследованию динамики электроэрозионного разрушения металлов	185
Е. Г. Шаер. Применение импульсных ламп для некоторых видов медицинской и антропологической фотографии	193
К. Е. Монахов. Аппаратура с импульсным источником света	200
А. И. Хохлов. Применение скоростной киносъемки с импульсными источниками света при исследовании аэродинамики и прочности вращающихся элементов авиационных конструкций	201
А. А. Кукибный. Исследование свободного полета зерен методом высокоскоростной киносъемки	203
Л. И. Маркаров. Применение высокоскоростной киносъемки к изучению процесса механизации сбора чайного листа	206
А. М. Рушайло. Экспериментальное исследование процесса входа тела в воду	207
Л. О. Макаров. Применение скоростной киносъемки для исследования процессов, происходящих в акустическом поле жидкости	211
С. В. Бухман. Применение скоростной фотокиносъемки в исследовании аэродинамических процессов и процессов горения	212
Г. Г. Трещев. Исследование поверхностного кипения с помощью высокоскоростной киносъемки	213
Б. В. Кубеев. Применение высокоскоростной съемки в высшей школе	215

Терминология

А. А. Сахаров. Терминология в области высокоскоростной фотографии и кинематографии	218
--	-----

Хроника

И. А. Черный. 3-й Международный конгресс по высокоскоростной фотографии	221
---	-----

УСПЕХИ НАУЧНОЙ ФОТОГРАФИИ

Том VI

*Утверждено к печати
Комиссией по научной фотографии и кинематографии
отделения химических наук Академии наук СССР
и Государственным Оптическим институтом
им. С. И. Вавилова*

Редактор издательства Ю. К. Имшенецкий
Технический редактор Э. Ю. Блейх
Корректор М. А. Брайтман

Сдано в набор 14 ноября 1958 г. Подписано к печати
26 июня 1959 г. РИСО АН СССР № 3 - 16В. Формат
бумаги 70 × 108¹/₁₆. Бум. л. 7. Печ. л. 14 - 19,18
усл. печ. л. Уч.-изд. л. 16,71. Изд. № 963. Тип. зак.
№ 70. М-04322. Тираж 2000.

Цена 11 р. 70 к.

Ленингр. отд. Издательства Академии наук СССР.
Ленинград, В-164, В. О., Менделеевская лин., л. 1.

Типография ГОИ

11p.70к.