

17-1336
9

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

УСПЕХИ НАУЧНОЙ ФОТОГРАФИИ

IX

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р

ОТДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ НАУК
КОМИССИЯ ПО НАУЧНОЙ ФОТОГРАФИИ И КИНЕМАТОГРАФИИ

УСПЕХИ НАУЧНОЙ ФОТОГРАФИИ

Том IX

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ФОТОГРАФИЯ
И КИНЕМАТОГРАФИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
Москва · 1964 · Ленинград

260142

Редакционная коллегия:

канд. физ.-мат. наук М. П. Ванюков, докт. техн. наук проф. Е. М. Голдовский,
 докт. хим. наук проф. Ю. Н. Гороховский, канд. техн. наук доц. О. Ф. Гребен-
 ников (зам. гл. редактора), канд. техн. наук доц. В. Г. Пелль (гл. редактор),
 проф. С. М. Проворнов (гл. редактор), А. А. Сахаров, канд. техн. наук И. Н. Чер-
 ный, член-корр. АН СССР К. В. Чибисов.

260142
 Центр научная
 библиотека
 Академии наук Грузинской ССР

УСПЕХИ НАУЧНОЙ ФОТОГРАФИИ

Том IX

Утверждено к печати
 Комиссией по научной фотографии и кинематографии
 Академии наук СССР

Редактор издательства А. Б. Березин, Технический редактор Н. Ф. Виноградова
 Корректоры М. А. Горилас, Н. И. Журавлева и Г. И. Яковлева

Сдано в набор 11/III 1965 г. Подписано к печати 22/VII 1965 г. РИСО АН СССР № 1-26В. Формат
 бумаги 70×108¹/₂. Бум. л. 10¹/₂. Печ. л. 21¹/₂ = 29.79 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 24.77. Изд. № 2445.
 Тип. зак. № 135. М-24547. Тираж 1500. ТП (доп.) 1965 г. № 178-179 Цена 1 р. 73 к.

Ленинградское отделение издательства «Наука». Ленинград, В-164, Менделеевская лин., д. 1

1-я тип. издательства «Наука». Ленинград, В-34, 9 линия, д. 12

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий том «Успехов научной фотографии» посвящен проблеме развития высокоскоростной фотографии и кинематографии в СССР и ее применению в различных областях науки и техники по материалам второго и третьего совещаний по высокоскоростной фотографии и кинематографии. Второе совещание было организовано Комиссией по научной фотографии и кинематографии АН СССР совместно с Московским государственным университетом им. М. В. Ломоносова и Всесоюзным научно-исследовательским кинофотоинститутом и проходило в Москве 23—26 мая 1960 г. Третье совещание, организованное Комиссией по научной фотографии и кинематографии совместно с Ленинградским институтом киноинженеров и Государственным оптическим институтом им. С. И. Вавилова, проходило в Ленинграде 4—7 июля 1962 г.

На совещаниях были прочитаны доклады, посвященные созданию новой аппаратуры, источникам света и светочувствительным материалам для высокоскоростной фотографии и кинематографии, а также многочисленным ее применениям.

В настоящем сборнике опубликовано большинство докладов, тексты которых были представлены авторами.

В сборник не вошли следующие доклады, опубликованные ранее в других журналах.

1. Г. И. Белинская. Качество изображения в высокоскоростных лупах времени. Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 6, № 3, 1961.

2. Г. Л. Шнирман, А. С. Дубовик, П. В. Кевлишвили, А. Б. Гранинг, И. А. Королев. Высокоскоростная ждущая лупа времени ЖЛВ-1. Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 8, № 1, 1963.

3. А. С. Дубовик, Н. М. Сицинская, Г. В. Колесов. Высокоскоростная растровая микрофотографическая установка СФР-Р. Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 8, № 2, 1963.

4. А. С. Дубовик, А. Б. Гранинг. Об определении положения центра развертки и о неравномерности частоты съемки в лупах времени с коммутацией изображения. Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 8, № 4, 1963.

5. В. В. Гарнов, В. В. Шауро. Высокоскоростная фотография самосветящихся процессов на цветной пленке. Журн. научн. и прикл. fotogr. и кинематогр., 8, № 4, 1963.

6. М. Н. Негодаев, А. И. Борисов, В. А. Татьков. Исследование гидродинамики углесоса методом высокоскоростной киносъемки. Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 9, № 2, 1964.

Ряд докладов передан для публикации в Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии. От публикации некоторых докладов редакционная коллегия вынуждена была по разным причинам отказаться.

В связи с ограниченным объемом сборника многие доклады по применению высокоскоростной съемки помещены в сокращенном виде, а именно: подробно изложены методика и техника применения высокоскоростной съемки и значительно сокращены разделы, касающиеся теоретических и экспериментальных выводов по исследованию данного вопроса методом высокоскоростной съемки.

ПРИБОРЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СЪЕМКИ

С. М. ПРОВОРНОВ, О. Ф. ГРЕБЕННИКОВ

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КИНОСЪЕМОЧНЫХ КАМЕР

Высокоскоростная киносъемка получила очень широкое распространение как наиболее объективный метод исследования быстропротекающих процессов. Известно много типов киносъемочных камер, отличных друг от друга как принципом действия, так и эксплуатационными характеристиками. Многие общепринятые характеристики, используемые для оценки аппаратов обычного назначения (для нормальных частот съемки), не всегда могут быть применены для оценки возможностей высокоскоростных киносъемочных камер. Отсутствие единой системы характеристик затрудняет сопоставление киносъемочных камер разных типов, а также выбор нужного типа камер для производства конкретных исследований быстропротекающих процессов.

В настоящей статье делается попытка дать определение некоторым, наиболее важным характеристикам, которые определяют возможности высокоскоростных съемочных камер. Под высокоскоростной съемочной аппаратурой условимся понимать установки, в которых съемка производится либо на неподвижном, либо на непрерывно движущемся светочувствительном материале. По мнению авторов, характеристика высокоскоростных камер должна содержать метод построения киносъемочной камеры, ее информационную способность и эксплуатационные показатели.

1. Методы построения высокоскоростных киносъемочных камер

В настоящее время известны следующие методы построения высокоскоростных киносъемочных камер: компенсация сдвига киноплёнки, применение коротких выдержек, коммутация изображений и киносъемка с разложением изображений на элементы.

Метод компенсации сдвига киноплёнки применяется в камерах с равномерно движущейся киноплёнкой и основан на использовании особых устройств, которые обеспечивают сдвиг изображения синхронно с движением киноплёнки. Наибольшее распространение получила оптическая компенсация, где сдвиг изображения достигается применением равномерно вращающихся оптических элементов (призм, линз, зеркал и пр.). Принципиально компенсация сдвига киноплёнки может осуществляться и другими средствами, например при помощи электронно-оптических преобразователей.

Метод коротких выдержек используется также в камерах с равномерным движением киноплёнки и основан на применении таких коротких выдержек, за время которых киноплёнка не успевает

переместиться на величину, большую допустимой нерезкости изображения. Осуществляется этот метод применением быстродействующих затворов или путем освещения объекта импульсными источниками света (щелевые, искровые камеры).

Метод коммутации изображений позволяет производить киносъемку на неподвижном светочувствительном материале. В камерах, работающих по этому методу, применяется множество отдельных фотографических систем, которые включаются последовательно через равные промежутки времени. Включение этих систем может осуществляться различными способами (механическим, электрическим, оптическим, электронно-оптическим и т. п.).

Метод киносъемки с разложением изображения на элементы позволяет производить киносъемку как на неподвижном, так и на непрерывно движущемся светочувствительном материале.

Сущность метода заключается в разложении изображения на отдельные, определенным образом расположенные элементы — кружки или полоски; во время съемки происходит относительное перемещение элементов изображения и светочувствительного материала. Благодаря тому что размер элементов в направлении их перемещения выбирается предельно малым, смазывания изображения практически при этом не происходит. В большинстве случаев для восстановления из фотографически зафиксированных элементов цельного фотографического изображения снятого объекта необходимо применять особые устройства (дешифраторы). К этому методу можно отнести фоторегистрацию, диссекцию изображений, растровые камеры, камеры с волоконной оптикой и т. п.

2. Информационная способность высокоскоростных киносъемочных камер

Поскольку в результате высокоскоростной киносъемки необходимо получить достаточное количество информации об исследуемом процессе, то информационная способность киносъемочных камер играет решающую роль при выборе камеры для исследования конкретного процесса.

Киносъемочные камеры характеризуются информационной способностью во времени, в пространстве и общим количеством получаемой информации.

Информационная способность во времени

Всеобщее признание для оценки информационной способности во времени получил термин «частота киносъемки», которая определяется количеством снимков, получаемых в секунду. В самом общем виде частота киносъемки определяется выражением

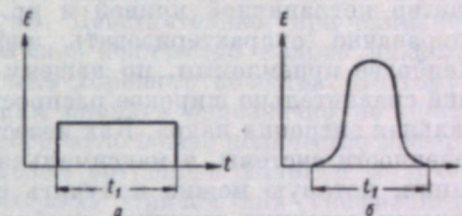
$$P = \frac{v}{h},$$

где v — скорость перемещения светочувствительного материала или оптического изображения относительно неподвижного светочувствительного материала, h — шаг кадра, который определяется минимальным перемещением светочувствительного материала или оптического изображения, необходимым для фиксации последующей фазы снимаемого объекта.

Если характеристику «частота киносъемки» подвергнуть более глубокому анализу, то окажется, что она в некоторых случаях не дает достаточно полного представления об информационной способности кино-

съемочных камер во времени. Действительно, в некоторых существующих камерах одновременно экспонируется несколько кадров, т. е. отношение времени выдержки к периоду смены кадров (обратной величине частоты съемки) у них больше единицы. Естественно, в подобных камерах информационная способность во времени будет меньше частоты киносъемки, поэтому для более полной характеристики информационной способности камеры во времени необходимо учитывать также отношение выдержки к периоду смены кадров. Последнюю величину часто называют скважностью.¹

Для определения скважности камеры необходимо знать изменение освещенности точки изображения за время выдержки. Если освещенность изображения в двух системах изменяется во времени по разным законам, то системы нельзя считать равноценными даже в том случае, если время выдержки и скважность в обеих камерах равны. Действительно, положим, в одной камере освещенность E точки изображения во времени t изменяется П-образно (см. рисунок, а), а в другой — по закону, изображенному на рисунке, б. Очевидно, в первом случае величина смазывания движущегося изображения за время выдержки t_1 будет больше, чем во втором случае. Вследствие этого и информационная способность во времени у данных камер будет разная. Очевидно, при определении информационной способности во времени необходимо учитывать не абсолютное значение времени выдержки, а время, определяемое величиной смазывания изображения движущихся предметов. За время выдержки в камерах со сложным законом изменения освещенности при определении скважности следует принять какую-то условную величину, например «эквивалентную выдержку», причем последняя может определяться величиной выдержки в камере с П-образным изменением освещенности, если величина смазывания изображения движущегося с заданной скоростью объекта в обоих случаях будет равна. Следовательно, для оценки информационной способности во времени высокоскоростных киносъемочных камер необходимо иметь в виду не только частоту киносъемки, но и скважность системы.



Два случая изменения освещенности точки изображения во времени.

Более общей характеристикой информационной способности камеры может служить получивший распространение параметр «разрешающая способность во времени», который, если скважность меньше единицы, очевидно, равен частоте съемки;² если же скважность больше единицы, то разрешающая способность во времени может быть принята равной обратной величине выдержки при съемке каждой фазы. Например, в камере ССКС-1 максимальная частота киносъемки 200 000 сек.⁻¹, а скважность равна 1.8; следовательно, разрешающая способность во времени в этой камере меньше частоты киносъемки и равна

$$200\,000 : 1.8 = 110\,000 \text{ сек.}^{-1}$$

Если относительно предела повышения частоты киносъемки говорить трудно, поскольку она определяется чисто техническими средствами,

¹ Иногда скважность определяют как отношение периода смены кадров к выдержке.

² Некоторые авторы под разрешающей способностью во времени понимают величину, обратную частоте киносъемки.

то предельное значение разрешающей способности во времени может быть определено сравнительно точно, так как оно определяется волновой природой света. Это имеет большое практическое значение, поскольку в настоящее время некоторые существующие камеры уже близко подходят к предельному значению разрешающей способности во времени.

Информационная способность в пространстве

В настоящее время информационную способность фотографических систем в пространстве обычно характеризуют качеством изображения, что не совсем верно, так как качество фотографического изображения оценить количественно не всегда представляется возможным, поскольку оно в значительной степени определяется эстетическими соображениями. В измерительной фотографии и кинематографии в первую очередь интересует количество получаемой информации. Для оценки информационной способности фотографических систем предложены различные критерии — разрешающая способность, частотно-контрастная характеристика, характер пограничной кривой и др. Однако все эти критерии не могут однозначно охарактеризовать информационную способность камеры. Наиболее приемлемым, по нашему мнению, является критерий, нашедший сравнительно широкое распространение в телевидении, это — максимальная энтропия кадра. Как известно, энтропия является мерой неопределенности системы, а максимальная энтропия равна количеству информации, которую можно получить о данной системе. Если считать, что яркости соседних участков изображения, находящихся на расстоянии предела разрешения оптической системы, независимы друг от друга и система может передать m градаций яркости, то энтропия оптического изображения равна

$$H = R^2 F \log m,$$

где R — разрешающая способность оптической системы, F — площадь кадра.

Однако яркости соседних участков в оптическом изображении, находящиеся на расстоянии $1/R$, не независимы, поэтому приведенная величина будет значительно больше действительного количества информации, которое можно получить из оптического изображения; кроме того, приведенная величина в эксплуатации не очень удобна, так как непосредственно, без сравнения с известной камерой, она может дать лишь смутное представление об информационной способности системы. Поэтому более удобно ввести понятие «относительная энтропия кадра». Последняя принимается равной отношению энтропии кадра данной камеры к энтропии стандартного кадра 35-мм камеры, т. е.

$$H' = \frac{R^2 F \log m}{R_{35}^2 F_{35} \log m_{35}}.$$

Достоинства этой характеристики заключаются в том, что и в числителе, и в знаменателе допущена общая ошибка (считается, что яркость соседних точек независима друг от друга), поэтому в отношении эта неточность в значительной степени компенсирована. Кроме того, любой оператор, имеющий даже небольшой опыт, зная количество информации, получаемой в 35-мм камере, без труда может определить количество информации, которое может дать характеризующаяся камера.

Например, камера ФП-22, у которой относительная энтропия равна примерно $1/20$, обеспечивает получение информации о пространстве в 20 раз меньше, чем в 35-мм камере.

Для более полной оценки информационной способности камеры, кроме относительной энтропии, следует учитывать отношение выдержки точки светочувствительного слоя к времени экспонирования всего поля кадра. Как известно, если это отношение меньше единицы, то изображение движущихся объектов будет искажено (деформировано), что, например, имеет место при съемке камерами со щелевым obturatorом.

Общее количество получаемой информации

Современные киносъемочные камеры, особенно предназначенные для очень больших частот съемки, как правило, ограничены в отношении количества снятых кадров за один пуск аппарата. В самом общем виде общее количество информации H_2 , получаемое за одну съемку, равно произведению энтропии кадра на количество снятых кадров N за один пуск аппарата

$$H_2 = R^2 F N \log m.$$

Однако практически данная величина дает далеко не полную характеристику высокоскоростной аппаратуры. Действительно, при одинаковых значениях H_2 можно получить большое количество кадров низкого качества и лишь несколько кадров очень хорошего качества. Поэтому, очевидно, общее количество информации оценить однозначно не представляется возможным. Наиболее целесообразно общее количество информации оценивать отдельно относительной энтропией кадра и количеством кадров, получаемых за одну съемку. Причем для унификации терминологии последнее имеет смысл называть термином, уже получившим некоторое распространение («оптическая емкость камеры»), так как для оценки камер, построенных по методу киносъемки с разложением изображения на элементы, применять термин «общее количество кадров, получаемых за одну съемку», не представляется возможным.

3. Эксплуатационные показатели высокоскоростных киносъемочных камер

Светосила

Светосила киносъемочных и фотографических аппаратов общего назначения характеризуется относительным отверстием съемочного объектива. Применение термина «относительное отверстие» в его обычном понимании для характеристики высокоскоростных киносъемочных аппаратов во многих случаях не представляется возможным, так как оптические системы многих современных высокоскоростных камер бывают сложны и, кроме основного фотографического объектива, содержат промежуточные объективы, сферические зеркала, растры и пр.

Наиболее целесообразно светосилу высокоскоростных аппаратов характеризовать особым понятием «эквивалентное относительное отверстие», которое при круглом выходном зрачке системы равно удвоенному синусу апертурного угла в пространстве изображения. Очевидно, если эквивалентное относительное отверстие оптической системы камеры равно относительному отверстию обычного фотографического объектива, то и светосилы их будут равны.

Если форма выходного зрачка отлична от круга, то для каждого конкретного случая эквивалентное относительное отверстие может быть вычислено таким образом, чтобы оно было равно относительному отверстию обычного объектива, имеющего одинаковую светосилу с оптической системой киносъемочной камеры.

Кроме эквивалентного относительного отверстия, в характеристике камеры необходимо указать коэффициент пропускания оптической системы.

При большой частоте киносъемки и ограниченной величине оптической емкости время съемки оказывается во многих случаях очень малым, поэтому возникает необходимость в точной синхронизации пуска камеры (СКС-1, с началом развития исследуемого процесса. В некоторых камерах (СКС-1, ФП-22 и др.) возможна синхронизация при подаче командного сигнала от пульта управления к камере, в некоторых же командный сигнал может быть подан только от камеры к объекту (камеры СФР, РКС-1, ЛВ-1 и др.).

Существуют киносъемочные камеры, которые, несмотря на небольшую оптическую емкость, могут быть включены и быть готовыми к съемке длительное время. Такие камеры не требуют синхронизации с объектом съемки, их обычно называют «ждущими». Следовательно, могут быть три типа камер: 1) с возможностью синхронизации при подаче командного сигнала к камере; 2) с возможностью синхронизации при подаче командного сигнала только от камеры к объекту съемки; 3) ждущие камеры.

Расположение входных зрачков

Некоторые высокоскоростные съемочные камеры имеют несколько входных зрачков, вследствие чего экспонирование последовательных кадров производится под различными ракурсами. Такие камеры мало пригодны для съемок с близкого расстояния (макрокиносъемок) и совершенно не пригодны для микрокиносъемок. В характеристике камеры необходимо указывать в подобных случаях расположение входных зрачков.

Камера для высокоскоростной съемки	Метод	Информационная способность						Эксплуатационные характеристики		
		частота киносъемки	связность	разрешающая способность во времени	относительная энтропия	отношение выдержки к периоду смены кадров	оптическая емкость	эквивалентное относительное отверстие	коэффициент пропускания	возможность синхронизации
СКС-1 ССКС-1	Оптическая компенсация.	4000 2×10^5	0.2 1.8	4000 1.1×10^5	1/4.5 1/17	— 1/3	4000 2500	— 1/18	— 0.5	К камере. Ждущая.
ФП-22 ФП-38	Оптическая коммутация.	10^5	1.7	6×10^4	1/20	1	7500	1/12	0.5	К камере.
СФР		5×10^6	2	2.5×10^6	1/20	1	416	1/11	0.25	От камеры.
ЛВ-1		2.5×10^6	2	1.25×10^6	1/18	1	240	1/18	0.5	»
ССКС-4		33×10^6	2	16.5×10^6	1/18	1	150	1/40	0.3	»
ВСКС-5	Фоторегистратор.	10^5	1.2	8.3×10^4	1	1	270	1/13	0.4	Ждущая.
СФР		6×10^6	1.5	4×10^6	1/9	1	500	1/50	0.5	От камеры.
РКС-1	Растровый.	—	—	1.2×10^8	1/450	1	7500	1/12	0.5	»
РКС-2		—	—	10^8	1/13	1	85	1/18	0.5	»
РКС-11		—	—	5×10^8	1/13	1	200	1/18	0.4	»
		—	—	10^5	1/9	1	300	1/5	0.5	Ждущая.

Кроме перечисленных характеристик высокоскоростных камер, следует указывать возможность съемки самосветящихся процессов, наличие и тип затвора, возможность производства макро- и микрокиносъемок, применение сменной оптики, пригодность получаемого материала для демонстрации на экран с помощью стандартного кинопроектора, формат светочувствительного материала, габариты, вес и пр.

Для иллюстрации изложенного в таблице сведены характеристики некоторых отечественных киносъемочных камер. При определении относительной энтропии было принято

$$R_{35} = 30 \text{ мм}^{-1}; F_{35} = 16 \times 22 = 352 \text{ мм}^2,$$

количество передаваемых градаций яркости m всех характеризующих камер принято равным m_{35} .

С. Г. ГРЕНИШИН, Ю. П. ЩЕПЕТКИН

ОБ УВЕЛИЧЕНИИ ЧАСТОТЫ СЪЕМКИ ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ ДВИЖЕНИИ ПЛЕНКИ

Киносъемочная аппаратура с прерывистым движением пленки имеет существенные преимущества перед аппаратурой, основанной на других принципах [1, 2]. Ее основные достоинства заключаются в возможности получения высокого качества фотографического изображения при большом относительном отверстии и линейном поле съемочного объектива, а также в простоте оптической схемы, легкости использования сменной оптики и большом числе кадров.

Предел частоты съемки при прерывистом движении 35-мм киноплёнки и шаге 19 мм [2, 3] ориентировочно $250 \div 300$ кадров/сек., достигнутый в современных киносъемочных камерах, устанавливается недостаточной прочностью межперфорационных перемычек. Между тем интерес к частотам съемки порядка $250 \div 1000$ кадров/сек. актуален и не существует аппаратуры, позволяющей вести съемку на этих частотах при прерывистом движении пленки.

Для увеличения частоты съемки нами использованы [4] механизм прерывистого движения пленки с элементами эластичности, обладающими достаточно высокой частотой собственных колебаний, и пульсирующий прижим пленки в фильмовом канале. Затормаживание пленки, вплоть до ее полной остановки в фильмовом канале, производится удерживанием ее не за края межперфорационных перемычек, а за подходящий участок (или участки) основы пленки с помощью прижимного пульсирующего элемента, которым может быть пульсирующий фильмовый канал или пульсирующий прижимной башмачок, рабочая сторона которого гладкая или имеет зубчики, попеременно то врезающиеся в основу пленки, создавая тем самым для себя по месту прижима «перфорационные» отверстия или углубления, то выходящие из зацепления с пленкой и освобождающие ее для протяжки на шаг кадра с помощью механизма транспортировки.

Периодическое, достаточно кратковременное затормаживание непрерывно протягиваемой пленки может не повести к ее обрыву, поскольку сама пленка обладает некоторой эластичностью, хорошо работая на растяжение и на изгиб, и в каждом конкретном случае существует предельная частота съемки, при которой механизм еще будет достаточно надежно работать. В момент прижима пленки в фильмовом канале участок пленки между местом прижима и тянущим барабаном накапливает энергию деформации, которая в следующий момент в какой-то мере будет затрачена, чтобы возместить «отставание» проэкспонированного участка.

Для увеличения длительности прижима (время покоя) необходимо ввести специальный элемент эластичности между фильмовым каналом и тянущим барабаном. Увеличение же частоты прерывистого движения пленки предопределяет ряд дополнительных требований к элементу эластичности.

Принципиальная схема предлагаемого механизма прерывистого движения пленки приведена на рис. 1, где B — пульсирующий башмачок, K — элемент эластичности, G — жесткое основание фильмового канала, C — пленка.

Нормальная работа механизма возможна при соблюдении следующих условий.

Во-первых, необходимо, чтобы частота собственных колебаний элемента эластичности, нагруженного прерывисто перемещаемым участком пленки, была существенно больше¹ и не была кратной частоте вынуждающей силы (частота съемки).

Как известно, частота собственных колебаний системы «масса—жесткость» определяется формулой

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma}{m}},$$

где f_0 — частота собственных колебаний, γ — жесткость элемента эластичности, m — масса.

Трудность осуществления высокочастотного механизма подобного рода заключается в элементе эластичности. Известные элементы эластичности не позволяют получить достаточно высокие значения f_0 при приемлемых усилиях протяжки $P_{\max}$, а следовательно, и высокие частоты прерывистой транспортировки пленки. Во-вторых, усилие протяжки P изменяется в течение одного периода; приращение ΔP должно быть по возможности одинаковым от периода к периоду, как по возможности неизменным должно быть и сопротивление протяжке собственно фильмового канала при выключенном пульсирующем башмачке.

Механизм прерывистого движения пленки осуществлен нами в действующем макете 35-мм киносъемочной камеры. В качестве элемента эластичности использованы [4] ячейки эластичности из упругих петель пленки, огибающей ролики.

Как известно [3, 5], жесткость изгиба упругой петли пленки резко растет с увеличением натяжения. Для одного из исследованных нами элементов эластичности, состоящего из трех ячеек эластичности (три упругие петли пленки, охватывающие три ролика $\varnothing 10$ мм), экспериментально в статике была найдена зависимость между удлинением ΔL упругих петель и величиной натяжения P . Кривая зависимости $P=f(\Delta L)$ для 3 роликов дана на рис. 2.

Наличие роликов, обладающих заметным коэффициентом трения в подшипниках и массой, несколько затрудняет работу упругих петель в динамике. В первом приближении, однако, влиянием роликов на работу упругих петель можно пренебречь (см. ниже). Если обозначить время стояния пленки в кадровом окне через t , а период одного кадра — τ ($\frac{1}{\tau} = n$, где n — число кадров/сек.), то $\frac{\tau}{t} = K$ и определяют «скважность».

¹ Этим, в частности, определяется время срабатывания элемента эластичности.

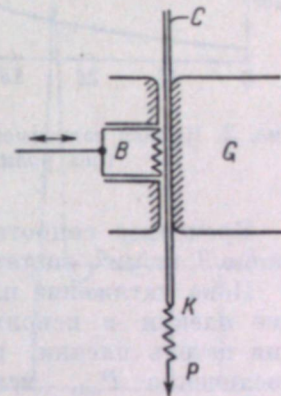


Рис. 1. Принципиальная схема механизма прерывистого движения пленки.

Из кривой для трех роликов, приведенной на рис. 2, видно, что если условие транспортировки пленки через фильмовый канал при выключенном пульсаторе равнялось бы, например, 100 г, то при изменении усилий, прикладываемых к пленке через элемент эластичности из 3 упругих петель, в интервале $100 \div 1000$ г, удлинение упругих петель могло бы равняться $\delta(\Delta L) \approx \approx 3.0$ мм, что при $K=4.0$ соответствовало бы шагу кадра

$$d = \delta(\Delta L) \times K \approx 12.0 \text{ мм.}$$

Известно, что целлулоидная основа пленки при растяжении может иметь относительное удлинение до 2% (напряжение порядка 4.5 кг/мм^2), подчиняясь в этом диапазоне закону Гука.

Временное сопротивление разрыву целлулоидной пленки составляет около 7 кг/мм^2 , ацетатной — 5 кг/мм^2 .

Пока натяжение пленки P_{max} сравнительно мало, мало и растяжение пленки и используется упругая деформация петель пленки, работающей на изгиб; при увеличении P_{max} используются оба эффекта. Если учесть, что жесткость пленки — величина переменная и может достигать сравнительно больших значений, а колеблющиеся массы пленки малы (вес погонного метра 35-мм пленки 7 г), и колеблются незначительные участки пленки (определяемые расстоянием между роликами), становится понятным, что в принципе могут быть получены довольно высокие частоты собственных колебаний петель.

С момента прижима пленки в фильмовом канале упругие петли начинают накапливать энергию деформации. При освобождении пленки башмаком петли отдают накопившуюся энергию, совершая работу протяжки пленки (на некоторую часть кадра) через фильмовый канал, причем в первый момент пленке сообщается значительное ускорение. В действующем макете принято расположение элементов по схеме, приведенной на рис. 3.

Участок пленки, транспортируемый прерывисто через фильмовый канал, воспринимает усилие транспортировки от тянущего барабана B_2 через элемент эластичности K . Последний начинает работать с момента прижима пленки в фильмовом канале; тянущее усилие возрастает, но не превосходит заданного предела. В момент выхода башмачка из зацепления с пленкой упругие петли стремятся вернуться в свое первоначальное состояние и совместно с тянущим барабаном протягивают пленку через фильмовый канал на шаг кадра.

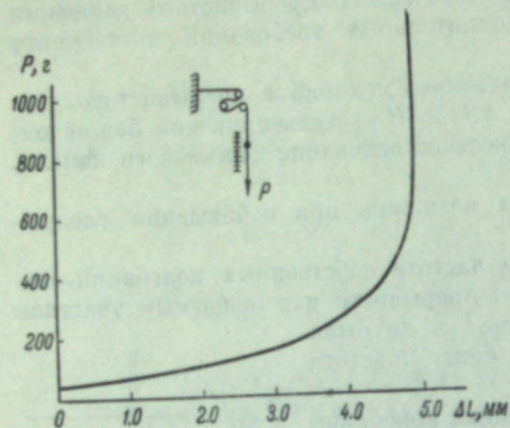


Рис. 2. Кривая зависимости $P=f(\Delta L)$ для трех роликов.

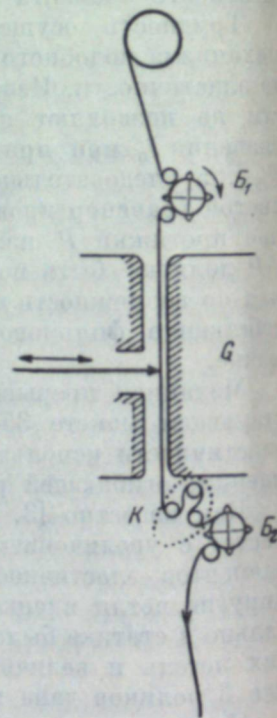


Рис. 3. Схема расположения элементов механизма прерывистого движения ленты в действующем макете.

Линейная скорость пленки на барабане B_1 и после элемента эластичности на барабане B_2 одинакова; перед фильмовым каналом имеется петля соответствующих размеров.

Как показал эксперимент, при определенных условиях влияние роликов на работу упругих петель может быть незначительным и в расчетах с успехом можно использовать статические кривые, подобные приведенным на рис. 2.

Вообще говоря, механизм взаимодействия роликов и упругих петель представляется достаточно сложным и малоизученным. Поведение роликов и упругих петель изучалось нами путем скоростной киносъемки (камера СКС-1 с частотой 4000 кадров/сек.) при разных режимах работы действующего макета камеры.

Оказалось, что все без исключения ролики вращаются с одинаковой угловой скоростью, причем периферическая скорость на роликах близка к линейной скорости протяжки пленки тянущим барабаном. Таким образом, в период стояния пленки в кадровом окне должно иметь место проскальзывание роликов относительно пленки; ролики работают в неодинаковых условиях, и наибольшее проскальзывание должен иметь ролик, стоящий непосредственно за фильмовым каналом.

В процессе работы механизма ролики накапливают довольно значительную кинетическую энергию вращения. В первый момент после остановки пленки в фильмовом канале, когда петли пленки достаточно «рыхлые», ролики еще не испытывают на себе сколь угодно заметного тормозящего действия упругих петель. Постепенно тормозящее действие возрастает, но все же оказывается незначительным и не вызывает ни колебаний скорости вращения роликов, ни заметных повреждений поверхности пленки.

Характер изменения скорости пленки в фильмовом канале и график скорости протяжки пленки барабанами приведены на рис. 4.

Непосредственно за фильмовым каналом пленка испытывает наиболее резкие колебания скорости и натяжения, но они существенно гасятся упругими петлями на выходе, перед транспортирующим барабаном (для защиты межперфорационных перемычек). С другой стороны, прочность участка пленки, удерживанием за который производится ее мгновенная остановка в фильмовом канале, велика.

Указанные обстоятельства ставят пленку в весьма выгодные условия работы, и она способна выдержать большие нагрузки без разрушения. Действующий макет испытан на частотах съемки 250 кадров/сек. при шаге до 46 мм, 500 кадров/сек. при шаге до 28 мм и 1000 кадров/сек. при шаге 11 мм. Получено высокое качество фотографического изображения. При шаге 19 мм и $K=3.0$ непостоянство шага не превосходило $0.3 \div 0.5$ мм. Имеются основания полагать, что указанный принцип с успехом может использоваться также для широкой рулонной пленки.

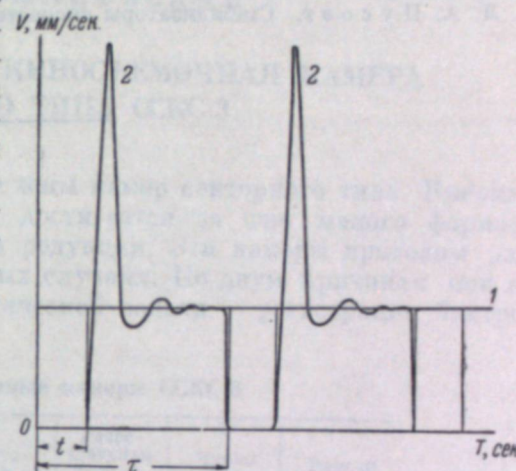


Рис. 4. Характер изменения скорости движения пленки в фильмовом канале и график скорости протяжки пленки барабанами.

1 — скорость пленки на транспортирующем барабане; 2 — кривая изменения скорости пленки в фильмовом канале.

Достоинством принципа является его универсальность: меняя число роликов, расстояние между ними, усилие протяжки в фильмовом канале, скорость протяжки пленки, частоту и длительность прижима можно в широких пределах варьировать частоту съемки, шаг кадра и «скважность».

ЛИТЕРАТУРА

1. J. S. Courtney-Pratt. Reports on Progress in Physics, XX, 379, 1957
2. Высокоскоростная киносъемка в науке и технике. Сб. статей, ИЛ М., 1955.
3. А. М. Мелик-Степанян, С. М. Проворнов. Детали и механизмы киноаппаратуры. Изд. «Искусство», М., 1959.
4. Ю. П. Щепеткин. Авт. свид. № 134982.
5. Л. А. Пуссэт. Стабилизаторы скорости фонограммы. Госкиноиздат, 1949.

И. И. КРЫЖАНОВСКИЙ

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ КИНОСЪЕМОЧНАЯ КАМЕРА ЖДУЩЕГО ТИПА ССКС-3

В последние годы появились схемы камер секторного типа. Высокая частота съемки этими камерами достигается за счет малого формата кадра (3.6×4.8 мм) и оптической редукиции. Эти камеры пригодны для съемки только в отдельных частных случаях. По двум причинам они не могут решать общей научно-технической задачи — регистрации быстро-

Основные данные камеры ССКС-3

Кинематическая скорость	Рабочее время съемки, мсек.	Частота съемки, кадры/сек.	Разрешающая способность, линий/мм	Число рабочих кадров	Размер кадра, мм
I	39.6	20000	25	795	7.5×10.5
II	15.6	50000	25	780	7.5×10.5
III	7.6	100000	25	760	7.5×10.5
IV	3.6	200000	25	720	7.5×10.5
V	2.2	300000	25	680	7.5×10.5

протекающих процессов для получения не только качественного, но и количественного анализа.

Во-первых, они не являются «ждущими», а поэтому не могут производить съемку громадного количества процессов, которые могут быть засняты только при управлении съемкой со стороны процесса. Во-вторых, при съемке объектов больших размеров на кадр 3.6×4.8 мм заснятые явления получаются в очень мелком масштабе, а поэтому точность измерения их низка. Для решения общей научно-технической задачи сверхскоростной киносъемки в Ленинградском институте точной механики и оптики автором разработана сверхскоростная киносъемочная камера ССКС-3 «ждущего» типа¹ (см. таблицу).

Новая схема позволяет при сравнительно небольших размерах камеры получить достаточно большое количество рабочих кадров и достигнуть высокой частоты киносъемки.

Камера ССКС-3 производит киносъемку на стандартную 16-мм киноплёнку. Размер кадра 7.5×10.5 мм. Общее число кадров 800. Камера имеет пять скоростей съемки в пределах от 20 000 до 300 000 кадров/сек.

¹ И. И. Крыжановский, авт. свид. № 135757.

Число рабочих кадров немного уменьшается по мере возрастания частоты съемки вследствие срезания некоторого количества кадров при открытии электродинамического затвора. Число рабочих кадров находится в пределах 790—600. Такое количество кадров дает возможность демонстрировать снятые фильмы при помощи стандартных 16-мм проекционных аппаратов в течение 25÷34 сек.

Относительное отверстие камеры составляет 1 : 7.8.

Для съемки ярких самосветящихся явлений, а также для съемки процессов совместно с тeneвым прибором камера имеет дополнительный сменный призмный разделительный блок. При установке этого блока относительное отверстие камеры составляет 1 : 14.5. Разрешающая способность камеры в обоих случаях — 25 линий/мм. Камера может фотографировать объекты, расположенные на расстоянии 0.8 м и далее, для чего имеются три сменных передних объектива с фокусными расстояниями 50, 100 и 200 мм. Относительное отверстие передних объективов 1 : 2.

Изображение объекта, полученное при помощи переднего объектива увеличивается оптическими каналами камеры в 1.3 раза. Следовательно имеются три эквивалентных фокусных расстояния камеры ($F_{\text{экв}}$), а соответственно им и поля зрения камеры:

При объективе $F = 50$ мм	$F_{\text{экв}} = 65$ мм,	поле зрения камеры	$11^{\circ}15'$
» » $F = 100$ мм	$F_{\text{экв}} = 130$ мм,	» »	$5^{\circ}44'$
» » $F = 200$ мм	$F_{\text{экв}} = 260$ мм,	» »	$2^{\circ}52'$

Для съемки мелких объектов в масштабе 1 : 1 и 1 : 2 к переднему объективу $F = 200$ мм имеются два насадочных объектива с фокусными расстояниями 260 и 520 мм. Следует отметить, что камера в процессе съемки обеспечивает строго одинаковые (стабильные) промежутки времени между кадрами при выбранной частоте съемки. Камера имеет сменную реперную сетку.

Постоянство промежутков времени между кадрами, наличие на снимке реперной сетки и большой размер кадра обеспечивают высокую точность обработки результатов заснятых процессов.

Частоты съемки стабилизированы с точностью 0.1%, поэтому отсчет времени в камере отсутствует.

Камера имеет синхронизирующее устройство, обеспечивающее синхронизацию открытия затвора с моментом начала развития быстротекающего процесса при управлении процессом со стороны камеры и при управлении камерой со стороны процесса. Камера имеет дистанционное управление.

Камера устанавливается на штативе, который обеспечивает поворот ее на 360° вокруг вертикальной оси и наклон объектива на $\pm 10^{\circ}$. Горизонтальное поперечное перемещение камеры на штативе ± 50 мм. Минимальное расстояние от объектива до пола 900 мм. Вертикальное перемещение камеры при помощи штатива от 900 до 1100 мм относительно уровня пола; штатив имеет ролики, при помощи которых камера может перемещаться по полу помещения. Питание камеры осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 в, потребляемая мощность 900 вт.

Принципиальная схема камеры представлена на рис. 1. Как видно из схемы, камера имеет четыре одинаковых оптических канала (I, II, III, IV). Каждый канал в последовательном порядке передает изображение снимаемого предмета на пленку. Получение изображения на пленке в одном канале происходит следующим образом. Объектив 1 строит изображение снимаемого предмета с помощью линзы 2 в плоскости диафрагмы 3. Объектив 4 при помощи разделительной призмы 6, промежуточных зеркал 7, 8, 9, 11 и объектива 10 строит изображение снимаемого предмета на центральном вращающемся зеркале 12, которое закреплено

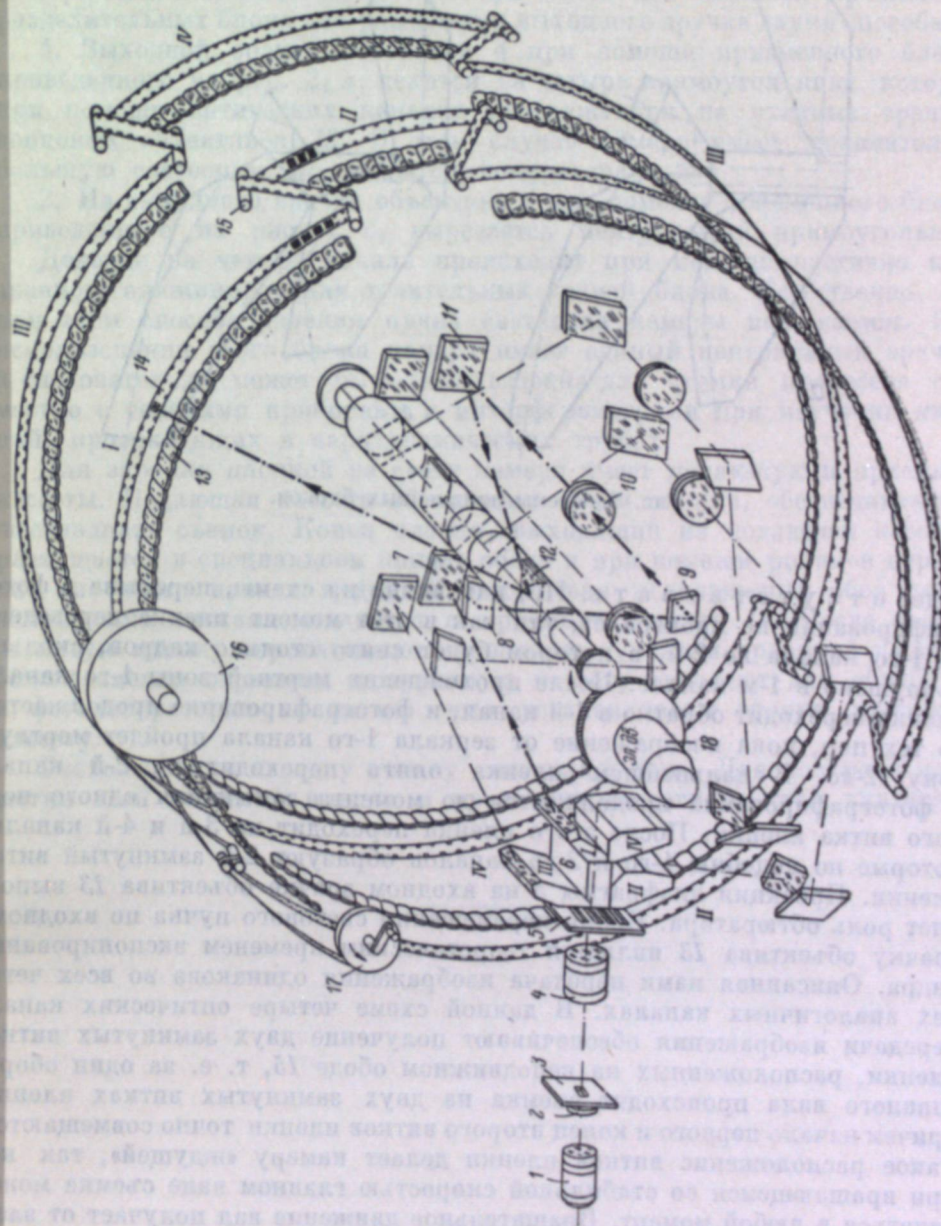


Рис. 1. Принципиальная схема камеры ССКС-3.

на главном валу. С центрального вращающегося зеркала изображения предмета проецируется при помощи венцовых объективов 13 на пленку 14 (с трехкратным уменьшением изображения). Изображение предмета, построенное объективом 1 в плоскости диафрагмы 3, строится на пленке с увеличением $V=1.3\times$ для камеры с 16-мм пленкой.

Одновременно объектив 10 строит изображение диафрагмы 5 с некоторым уменьшением на входном зрачке объектива 13. При вращении центрального зеркала световой пучок последовательно перемещается по венцу объективов 13, образуя на неподвижной пленке ряд последовательных кадров. Однако, когда вращающееся зеркало первого канала займет положение, близкое к перпендикулярному относительно вводимого светового пучка ($\pm 10^\circ$), изображение на пленке первого канала

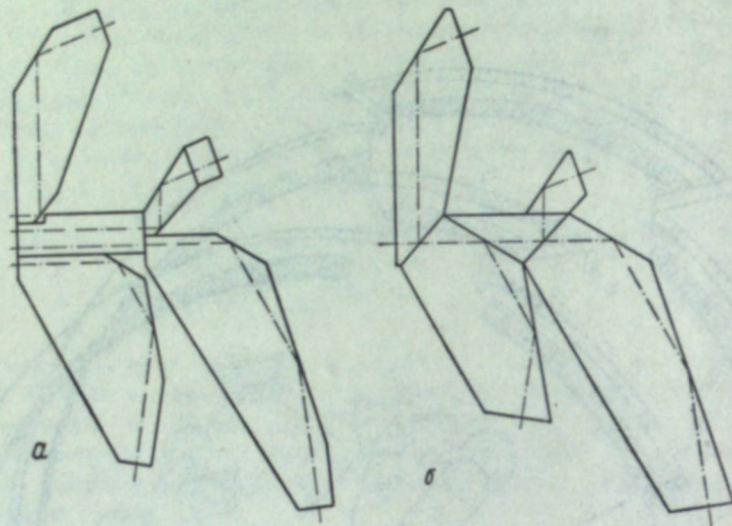


Рис. 2. Схемы призмных блоков.

будет отсутствовать. Но, как видно из схемы, прерыва в фотографировании не произойдет, так как в этот момент пленка переведена из 1-го канала во 2-й, в котором будет снято столько кадров, сколько пропущено в 1-м канале. После прохождения мертвой зоны 1-го канала пленка переходит обратно в 1-й канал, и фотографирование продолжается до тех пор, пока изображение от зеркала 1-го канала пройдет мертвую зону 2-го. В дальнейшем пленка опять переходит на 2-й канал и фотографирование продолжается до момента замыкания одного полого витка пленки. После этого пленка переходит на 3-й и 4-й каналы, которые по подобию 1-го и 2-го каналов образуют 2-й замкнутый виток пленки. Проекция диафрагмы 5 на входном зрачке объектива 13 выполняет роль obturатора. Время перемещения светового пучка по входному зрачку объектива 13 является теоретическим временем экспонирования кадра. Описанная нами передача изображения одинакова во всех четырех аналогичных каналах. В данной схеме четыре оптических канала передачи изображения обеспечивают получение двух замкнутых витков пленки, расположенных на неподвижном ободе 15, т. е. за один оборот главного вала происходит съемка на двух замкнутых витках пленки, причем начало первого и конец второго витков пленки точно совмещаются. Такое расположение витков пленки делает камеру «ждущей», так как при вращающемся со стабильной скоростью главном валу съемка может начаться в любой момент. Вращательное движение вал получает от электродвигателя 18 при помощи двух шестерен.

Необходимо синхронизировать начало развития процесса лишь с началом открытия электродинамического затвора, который помещается в плоскости диафрагмы 3. Электродинамический затвор открывается от управляющего импульса на время экспонирования всего числа рабочих кадров, расположенных на двух витках пленки. Расположение на ободе двух витков пленки позволяет в два раза уменьшить габариты камеры по диаметру при достаточно большом числе рабочих кадров. Уменьшение габарита камеры имеет существенное значение, так как камеру приходится переносить от одного объекта съемки к другому.

В приведенной схеме камеры частота съемки зависит от скорости вращения главного вала, диаметра камеры и величины шага между кадрами. Следует отметить, что разделение выходного зрачка второго объектива 4 при помощи разделительных призм на четыре канала происходит в параллельном ходе лучей. Камера имеет два сменных призмных разделительных блока для разделения выходного зрачка двумя способами:

1. Выходной зрачок объектива 4 при помощи призмного блока, приведенного на рис. 2, а, делится на четыре прямоугольника, которые при помощи оптических каналов изображаются на входных зрачках венцовых объективов 13. В этом случае камера имеет сравнительно большую светосилу, но является четырехзрачковой.

2. Из выходного зрачка объектива 4 при помощи призмного блока, приведенного на рис. 2, б, вырезается центральный прямоугольник.

Деление на четыре канала происходит при помощи частично прозрачного алюминирования делительных граней блока. Естественно, что при этом способе деления пучка светосила камеры понижается. При использовании этого блока камера имеет единый центральный зрачок, а следовательно, может быть использована для съемки процессов совместно с теневыми приборами и интерферометрами при изучении явлений, происходящих в аэродинамических трубах.

Для зарядки пленкой на свету камера имеет подающую и приемную кассеты. Подающая кассета 16 вмещает объем пленки, обеспечивающий шестнадцать съемок. Конец пленки, выходящий из подающей кассеты, размещается в специальном канале обода и при помощи роликов переходит из одного канала в другой, опоясывая неподвижный обод двумя замкнутыми витками, и входит в приемную кассету 17. После съемки отснятую пленку перематывают вращением рукоятки приемной кассеты. Конец пленки отрезают, и приемную кассету передают для обработки в фотолабораторию, а на ее место устанавливают вторую приемную кассету.

Расход пленки на одну съемку составляет 8 м. Для контроля перематки всей отснятой пленки в приемную кассету имеется указатель.

И. И. КРЫЖАНОВСКИЙ

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ КИНОСЪЕМОЧНАЯ КАМЕРА ЖДУЩЕГО ТИПА ССКС-4

Особый интерес представляют камеры ждущего типа, которые не требуют синхронизации с объектом съемки. Под руководством автора ранее были разработаны и построены три опытных образца высокоскоростных камер ждущего типа ССКС-3 с частотой киносъемки до 300 000 кадров/сек. на 16-мм стандартную киноленту при размере кадра 7.5×10.5 мм.

В данной работе рассматривается вариант конструкции камеры ждущего типа ССКС-4, в которой съемка производится на стандартную 35-мм киноленту при шаге кадра 19 мм и размере кадра 16×22 мм (см. таблицу).

Основные данные камеры ССКС-4

Кинематическая скорость	Рабочее время съемки, мсек.	Частота съемки, кадры/сек.	Разрешающая способность, линии/мм	Число рабочих кадров	Размер кадра, мм
I	38	8000	22	312	16×22
II	15	20000	22	300	16×22
III	7	40000	22	280	16×22
IV	4.3	60000	22	260	16×22
V	3	80000	22	240	16×22
VI	2.2	100000	22	220	16×22

Камера ССКС-4 является универсальным прибором и позволяет производить киносъемки с частотой от 8000 до 100 000 кадров/сек. Число рабочих кадров в зависимости от частоты съемки находится в пределах от 220 до 312. Камера имеет шесть стабильных частот съемки: 8000, 20 000, 40 000, 60 000, 80 000 и 100 000 кадров/сек.

Камера ССКС-4 может фотографировать объекты, расположенные на расстоянии 0.8 м и далее, для чего имеется четыре сменных передних объектива с фокусными расстояниями 50, 100, 150 и 200 мм. Изображение объекта, полученное при помощи переднего объектива, увеличивается оптическими каналами камеры в 1.7 раза. Следовательно, будем иметь четыре эквивалентных фокусных расстояния камеры ($F_{\text{экв}}$), а соответственно им и поля зрения камеры:

При объективе $F = 50$ мм	$F_{\text{экв}} = 85$ мм,	поле зрения камеры	$17^\circ 20'$
" " $F = 100$ мм	$F_{\text{экв}} = 170$ мм,	" " "	$8^\circ 40'$
" " $F = 150$ мм	$F_{\text{экв}} = 255$ мм,	" " "	$5^\circ 26'$
" " $F = 200$ мм	$F_{\text{экв}} = 340$ мм,	" " "	$4^\circ 20'$

Эквивалентное относительное отверстие камеры 1:12.7.

Для съемки малых объектов в масштабе 1:1 и 1:2 к переднему объективу $F=200$ мм по желанию заказчика поставляются два насадочных объектива с фокусными расстояниями 340 и 680 мм.

Следует отметить, что камера в процессе съемки обеспечивает строго одинаковые (стабильные) промежутки времени между кадрами при выбранной частоте съемки. Частоты съемки камеры стабилизированы с точностью 0.1%, поэтому отметчик времени в камере отсутствует.

Постоянство промежутков времени между кадрами, наличие стабилизации частоты съемки и большой размер кадра обеспечивают высокую точность обработки результатов заснятых процессов.

Камера имеет синхронизирующее устройство, обеспечивающее синхронизацию открытия затвора с моментом начала развития быстротекающего процесса, при управлении процессом со стороны камеры и при управлении камерой со стороны процесса. Камера имеет дистанционное управление. Пульт управления может быть расположен на расстоянии 15, 35 и 50 м от камеры. Последняя устанавливается на штативе, который обеспечивает поворот ее на 360° вокруг вертикальной оси и наклон на $\pm 10^\circ$. Горизонтальное поперечное перемещение камеры на штативе ± 50 мм. Минимальное расстояние от объектива до пола 900 мм. Вертикальное перемещение камеры при помощи штатива от 900 до 1100 мм относительно уровня пола. Штатив имеет ролики, при помощи которых камера может перемещаться по полу помещения. Питание камеры осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 в, потребляемая мощность 900 вт.

К камере ССКС-4 разработана специальная насадка для двухпозиционной и стереоскопической киносъемки, а также насадка для киносъемки с увеличением в $4\times$, $6.5\times$ и $13\times$.

Принципиальная схема камеры аналогична схеме камеры ССКС-3 (стр. 19 настоящего сборника). На рисунке (см. вклейку, стр. 32) приведена фотография комплекта камеры.

И. П. КРЫЖАНОВСКИЙ

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ КИНОСЪЕМОЧНАЯ КАМЕРА С ЧАСТОТОЙ СЪЕМКИ ДО 6 000 000 КАДРОВ В СЕКУНДУ

Существующие высокоскоростные киносъемочные камеры ФП-22 (ГОИ) с частотой съемки до 100 000 сек.⁻¹ при кадре 4.5×4.8 мм, ССКС-1 (ЛИТМО) с частотой киносъемки до 200 000 сек.⁻¹ при размере кадра 3.5×6 мм и камера ССКС-3 (ЛИТМО) с частотой съемки до 300 000 сек.⁻¹ при кадре 7.5×10.5 мм обеспечивают киносъемку подавляющего большинства быстропротекающих процессов новой техники. Однако имеется более узкая группа физических процессов, которая не может быть охвачена перечисленными камерами, как например распространение упругих волн в прозрачных моделях, процессы горения и взрыва, искровой разряд и некоторые другие.

Для регистрации этих процессов в Ленинградском институте точной механики и оптики разработана высокоскоростная киносъемочная камера ВСКС-5 с частотой киносъемки до 6 000 000 сек.⁻¹. Камера может снимать самосветящиеся и освещенные проходящим пучком света процессы.

Съемка производится на стандартную 16-мм киноплёнку. Камера имеет 8 стабильных частот киносъемки: 100 000, 250 000, 500 000, 1 000 000, 1 500 000, 2 500 000, 3 000 000 и 6 000 000 сек.⁻¹.

Камера в процессе съемки обеспечивает строго одинаковые промежутки времени между кадрами при выбранной частоте киносъемки. Частоты съемки камеры стабилизированы с точностью 0.1%, поэтому отсчетчик времени в камере отсутствует.

Основные характеристики камеры ВСКС-5 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Кинематическая скорость	Рабочее время съемки, мсек.	Частота съемки, сек. ⁻¹	Разрешающая способность, линии/мм	Число рабочих кадров	Число оборотов зеркал в минуту	Размер кадра, мм
I	2500	100000	25	250	1500	7.5 × 10.5
II	1000	250000	25	250	3700	7.5 × 10.5
III	500	500000	25	250	7500	7.5 × 10.5
IV	250	1000000	25	250	15000	7.5 × 10.5
V	166	1500000	25	250	22500	7.5 × 10.5
VI	100	2500000	25	250	37500	7.5 × 10.5
VII	80	3000000	25	250	45000	7.5 × 10.5
VIII	80	6000000	25	500	45000	3.6 × 10.5

В комплект камеры ВСКС-5 входит специальная насадка для двухпозиционной и стереоскопической киносъемки. При использовании этой

насадки можно на одном кадре получить снимок с двух взаимно-перпендикулярных сторон или пару стереоскопических снимков. Кроме того, возможна съемка через насадку с увеличением в 2.5×, 4× и 8×.

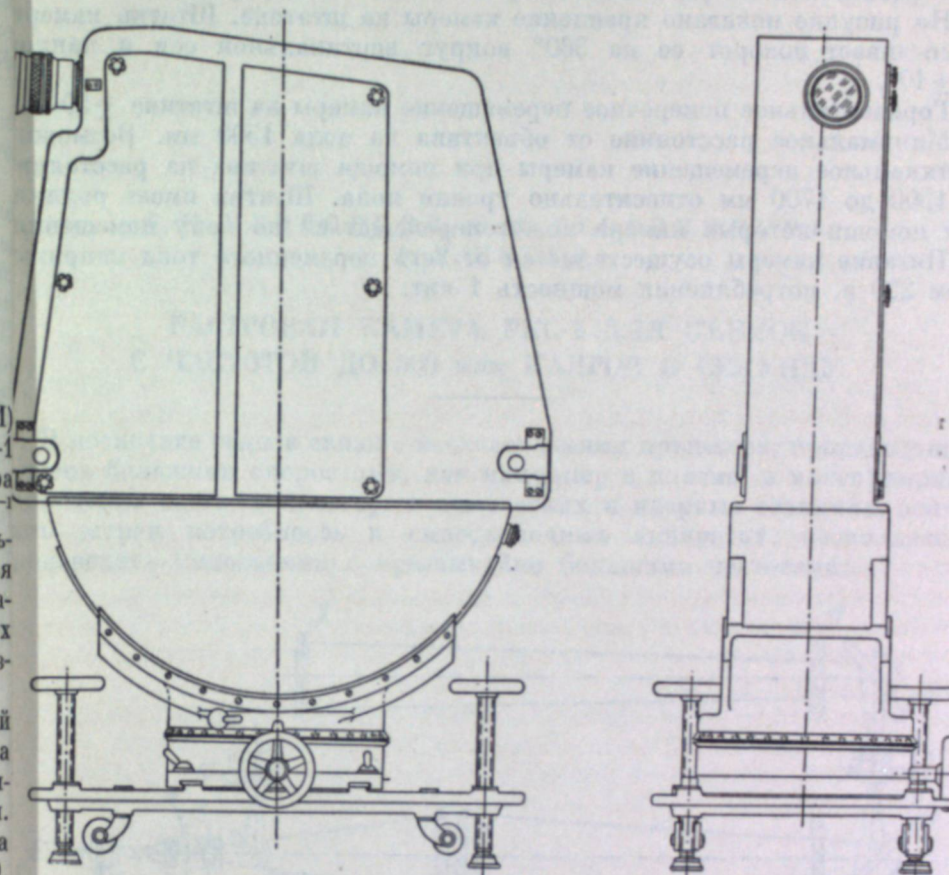


Схема крепления камеры ВСКС-5 на штативе.

Следует отметить, что камера ВСКС-5 может работать и в варианте стереорегистратора. Для этого камере придаются два сменных объектива. Длина фоторазвертки составляет 1.9 м. Число скоростей, время съемки скорости развертки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Кинематическая скорость	Рабочее время съемки, мсек.	Скорость развертки, км/сек.	Ширина развертки, мм	Длина развертки, мм
I	2500	0.76	10.5	1900
II	1000	1.90	10.5	1900
III	500	3.8	10.5	1900
IV	250	7.6	10.5	1900
V	166	11.4	10.5	1900
VI	100	19.0	10.5	1900
VII	80	22.8	10.5	1900

Камера имеет синхронизирующее устройство, обеспечивающее синхронизацию открытия электродинамического затвора с моментом начала

развития быстропротекающего процесса, при управлении процессом со стороны камеры.

Камера имеет дистанционное управление. Пульт управления может быть установлен на расстоянии 15, 35 и 50 м от камеры.

На рисунке показано крепление камеры на штативе. Штатив камеры обеспечивает поворот ее на 360° вокруг вертикальной оси и наклон на $\pm 10^\circ$.

Горизонтальное поперечное перемещение камеры на штативе ± 50 мм.

Минимальное расстояние от объектива до пола 1500 мм. Возможное вертикальное перемещение камеры при помощи штатива на расстоянии от 1500 до 1700 мм относительно уровня пола. Штатив имеет ролики, при помощи которых камера может перемещаться по полу помещения.

Питание камеры осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 в, потребляемая мощность 1 квт.

С. М. ПРОВОРНОВ, О. Ф. ГРЕБЕННИКОВ,
В. П. ГУСЕВ

РАСТРОВАЯ КАМЕРА РКС-2 ДЛЯ СЪЕМОК С ЧАСТОТОЙ ДО 500 млн КАДРОВ В СЕКУНДУ

В последние годы в связи с исследованиями процессов, происходящих очень большими скоростями, как например в плазме, в молекулярных излучателях света, в некоторых химических и ядерных реакциях, появилась острая потребность в киносъемочных аппаратах, позволяющих производить киносъемки с чрезвычайно большими частотами.

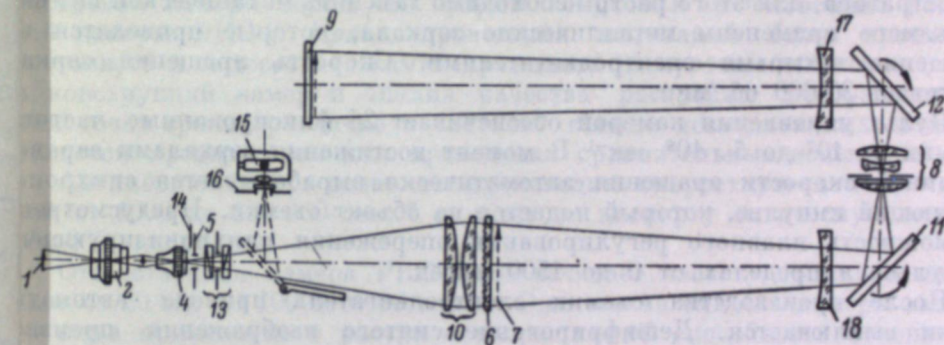


Рис. 1. Принципиальная схема камеры РКС-2.

Известно, что наиболее перспективным из оптико-механических методов построения высокоскоростных киносъемочных камер в отношении достижения очень больших частот съемки является растровый метод [1]. Так, в 1958 г. коллективом сотрудников Ленинградского института инженеров была разработана растровая камера РКС-1 [2], позволяющая производить киносъемки с частотой до 100 млн кадров/сек. Несколько образцов камеры РКС-1 в настоящее время успешно используется для исследований быстропротекающих процессов. Однако в некоторых случаях требуется значительно большая частота киносъемки. Перед коллективом сотрудников кафедры кинофотоаппаратуры ЛИКИ была поставлена задача создания киносъемочной камеры РКС-2, обеспечивающей частоту съемки до 500 млн кадров/сек.

На рис. 1 представлена оптическая схема камеры РКС-2. Съёмочный объектив 2 строит промежуточное изображение объекта съемки 1 в плоскости 3. Микрообъектив 4 образует изображение объекта съемки в плоскости линзового растра 6. За растром в плоскости 7 образуется растровое изображение объекта съемки. Промежуточный объектив 8 изображает плоскость 7 в плоскости фотопластины 9. Таким образом, в плоскости фотопластины образуется растровое изображение объекта съемки.

Линзы 10 выполняют функции коллектива. Перед вращающимися зеркалами установлены защитные плоскопараллельные стеклянные пластины или корректирующие линзы 17 и 18.

Смещение растрового изображения относительно фотопластины достигается зеркалами 11 и 12, которые вращаются при съемке в направлениях, указанных на рисунке стрелками.

В качестве промежуточного объектива в камере применен репродукционный объектив «Индустр-11М» с фокусным расстоянием 450 мм и относительным отверстием 1:9.

В комплект камеры входят три съемочных объектива с фокусными расстояниями 35, 50 и 85 мм.

В камере предусмотрена возможность производства как макросъемки, так и микрокиносъемки. Съемка производится на фотопластины размером 13×18 см. Пластины устанавливаются в кассете, которая позволяет производить перезарядку камеры на свету.

Разложение изображения на элементы достигается в камере РКС линзовыми точечными растрами, изготовленными в стереолаборатории НИКФИ. Камера комплектуется двумя растрами с шагом 0.4 и 0.7 мм.

В случае применения растра с шагом 0.4 мм оптическая емкость системы составляет 90 кадров, при шаге растра 0.7 мм — 250 кадров.

В первом случае качество получаемого изображения примерно соответствует качеству изображения, получаемому в 16-мм камерах, во втором случае — в 8-мм камерах. Камера может работать в режиме фоторегистратора, для этого растр необходимо заменить механической щелью. В камере применены металлические зеркала, которые приводятся в вращение четырьмя электродвигателями. Скорость вращения зеркала достигает 30 000 об./мин.

Пульт управления камерой обеспечивает 24 фиксированные частоты съемки от 10^7 до $5 \cdot 10^8$ сек⁻¹. В момент достижения зеркалами заданной скорости вращения автоматически вырабатывается синхронизирующий импульс, который подается на объект съемки. Предусмотрена возможность плавного регулирования опережения синхронизирующего импульса в пределах от 0 до 1500 мксек.

После производства съемки электродвигатель привода автоматически выключается. Дешифрирование снятого изображения производится на самой камере. Для этого служит осветитель 15, который освещает диафрагму 16. Свет от диафрагмы направляется поворотным зеркалом 17 на растр, при этом в плоскости негатива 9 образуются высвечивающиеся растровые элементы, выделяющие отдельные фазы снятого процесса. Воспроизведение растрового киноизображения достигается поступательным перемещением кассеты с негативом. В комплект камер входит киносъемочный аппарат 16С-2, приспособленный для перемотки и титрования снятого изображения на 16-мм киноплёнку.

В камере предусмотрена возможность применения электромеханического и электрооптического (ячейка Керра) затворов, обозначенных на рис. 1 цифрами 5, 13 и 14.

На рис. 2 (см. вклейку, стр. 32) приведена фотография комплекта растровой установки.

На рис. 3 (см. вклейку, стр. 33) представлены отдельные кадры фильма, снятого камерой РКС-2 с частотой 260 млн сек⁻¹. Кадры фильма показывают развитие разряда в импульсной лампе ИСП-5.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. Ф. Гребенников. Растровый метод скоростной киносъемки. УНФ, 1959.
2. С. М. Проворнов, О. Ф. Гребенников. Камера РКС-1 для высокоскоростных киносъемок. ПТЭ, № 6, 1959.

Л. В. АКИМАКИНА, М. Д. БОДРОВА,
С. П. ИВАНОВ, Д. Ф. ИВЧЕНКО

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АНГЛИЙСКОЙ РАСТРОВОЙ КАМЕРЫ СЕРИИ 600 ФИРМЫ ТОМПСОН И ОТЕЧЕСТВЕННОЙ РАСТРОВОЙ КАМЕРЫ РКС-1

В 1961—1962 гг. коллектив авторов провел исследование английской растровой камеры серии 600 фирмы Томпсон и отечественной растровой камеры РКС-1. Целью проведения испытаний были выявление достоинств и недостатков самих принципов построения оптических схем конструкций камер и анализ качества растровых изображений. С английской камерой позволяется производить скоростную съемку с частотой от 1000 до 150 000 сек⁻¹ и имеет по паспорту оптическую емкость $N=300$ кадров.

Отечественная камера РКС-1 обеспечивает частоту съемки в диапазоне от 20 000 до 100 000 000 сек⁻¹. Оптическая емкость камеры зависит от частоты шага применяемого растра и разрешающей способности фотопластины. Так, оптическая емкость камеры при применении фотопластинок типа «ФЭУ» для растра с шагом 0.4 мм $N=85$ кадрам, для растра с шагом 0.7 мм $N=190$ кадрам.

На рис. 1 изображена оптическая схема английской растровой камеры серии 600. Объект съемки 1 изображается съемочным объективом 2 в плоскости растра 3. Каждая линза растра 3 изображает апертурную диафрагму 4 съемочного объектива в плоскости 5, давая изображение объекта, разложенное на точечные элементы. В плоскости 5 помещается фотопластинка размером 101×127 мм. Смещение элементов растрового изображения относительно светочувствительного материала производится диском Нипкова, помещенным в плоскости апертурной диафрагмы съемочного объектива. Центр вращения диска смещен относительно центра апертурной диафрагмы объектива так, что 10 отверстий $\phi 1.25$ мм, имеющих на диске, попеременно пересекают апертурное отверстие объектива. Для любого смещения подвижного отверстия диска Нипкова получаем пропорциональное смещение элементов растрового изображения в фокальной плоскости линз растра.

На рис. 2 приведена принципиальная оптическая схема камеры РКС-1. Съемочный объектив дает изображение объекта съемки в плоскости растра. Каждая линза растра изображает в плоскости 5 выходной зрачок съемочного объектива, давая изображение объекта съемки, разложенное

на точечные элементы. Промежуточный объектив переносит картинку, полученную в плоскости 5, в плоскость фотопластины, имеющей размер 90×120 мм. Смещение элементов растрового изображения относительно фотослоя производится двумя вращающимися зеркалами.

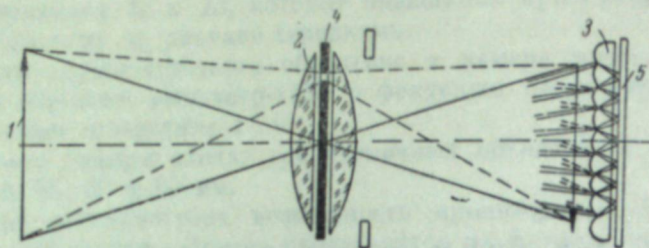


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема английской растровой камеры серии 600.

Существенное различие сравниваемых камер заключается в исполнении зрительной трубы. В английской камере используется ортогональный линзовый раскрасочный механизм, в отечественной — цилиндрический. В английской камере постоянна и определяется числом оборотов диска Нипкова, так что на фотослой за каждой линзой раstra приходится один оборот диска (экспозицию) засвечивается десять дуг концентрических окружностей (дорожек экспонирования). Шаг этих дорожек

В английской камере используется ортогональный линзовый раскрасочный механизм, в отечественной — цилиндрический. В английской камере постоянна и определяется числом оборотов диска Нипкова, так что на фотослой за каждой линзой раstra приходится один оборот диска (экспозицию) засвечивается десять дуг концентрических окружностей (дорожек экспонирования). Шаг этих дорожек

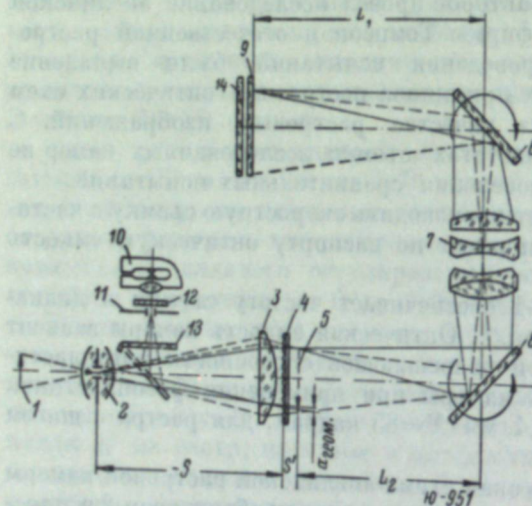


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема камеры РКС-1.

1 — объект съемки; 2 — съемочный объектив; 3 — коллектор; 4 — растр; 5 — плоскость растрового изображения; 6 и 8 — вращающиеся зеркала; 7 — промежуточный объектив; 9 — фотопластинка; 10 — осветитель; 11 — диафрагма; 12 и 14 — матовые стекла; 13 — поворотное зеркало.

В отечественной камере РКС-1 используется гексагональный линзовый растр, изготовленный в НИКФИ с шагом элементов 0.4 и 0.7 мм. Эти растры не имеют указанных выше недостатков французских растров.

В отечественной камере РКС-1 используется гексагональный линзовый растр, изготовленный в НИКФИ с шагом элементов 0.4 и 0.7 мм. Эти растры не имеют указанных выше недостатков французских растров.

на рис. 3, в и г приведены для сравнения микрофотографии изображений тех же объектов (нити электрической лампы и радиальной миры) фокальной плоскости линз гексагонального раstra: ни анаморфирования изображения, ни координатной сетки здесь нет.

Это сравнение позволяет прийти к заключению, что гексагональные растры НИКФИ дают более качественное изображение, чем ортогональные французские растры, и не предъявляют особых требований к контрастности фотослоя. Этим обеспечивается возможность получения высококачественных полутонных изображений.

Использование английской камеры с отечественными гексагональными растрами НИКФИ позволяет повысить качество растрового изображения.

При сравнении принципиальных оптических схем обеих камер обнаруживается существенное различие в смещении элементов растрового изображения относительно светочувствительного материала.

В камере РКС-1 смещение происходит в одном направлении с помощью зеркального редуктора. В английской камере смещение растрового изображения производится поочередно десятию отверстиями вращающегося диска Нипкова, так что на фотослой за каждой линзой раstra приходится один оборот диска (экспозицию) засвечивается десять дуг концентрических окружностей (дорожек экспонирования). Шаг этих дорожек

В английской камере используется ортогональный линзовый раскрасочный механизм, в отечественной — цилиндрический. В английской камере постоянна и определяется числом оборотов диска Нипкова, так что на фотослой за каждой линзой раstra приходится один оборот диска (экспозицию) засвечивается десять дуг концентрических окружностей (дорожек экспонирования). Шаг этих дорожек

В английской камере используется ортогональный линзовый раскрасочный механизм, в отечественной — цилиндрический. В английской камере постоянна и определяется числом оборотов диска Нипкова, так что на фотослой за каждой линзой раstra приходится один оборот диска (экспозицию) засвечивается десять дуг концентрических окружностей (дорожек экспонирования). Шаг этих дорожек

В английской камере используется ортогональный линзовый раскрасочный механизм, в отечественной — цилиндрический. В английской камере постоянна и определяется числом оборотов диска Нипкова, так что на фотослой за каждой линзой раstra приходится один оборот диска (экспозицию) засвечивается десять дуг концентрических окружностей (дорожек экспонирования). Шаг этих дорожек

В английской камере используется ортогональный линзовый раскрасочный механизм, в отечественной — цилиндрический. В английской камере постоянна и определяется числом оборотов диска Нипкова, так что на фотослой за каждой линзой раstra приходится один оборот диска (экспозицию) засвечивается десять дуг концентрических окружностей (дорожек экспонирования). Шаг этих дорожек

В английской камере используется ортогональный линзовый раскрасочный механизм, в отечественной — цилиндрический. В английской камере постоянна и определяется числом оборотов диска Нипкова, так что на фотослой за каждой линзой раstra приходится один оборот диска (экспозицию) засвечивается десять дуг концентрических окружностей (дорожек экспонирования). Шаг этих дорожек

В английской камере используется ортогональный линзовый раскрасочный механизм, в отечественной — цилиндрический. В английской камере постоянна и определяется числом оборотов диска Нипкова, так что на фотослой за каждой линзой раstra приходится один оборот диска (экспозицию) засвечивается десять дуг концентрических окружностей (дорожек экспонирования). Шаг этих дорожек

В английской камере используется ортогональный линзовый раскрасочный механизм, в отечественной — цилиндрический. В английской камере постоянна и определяется числом оборотов диска Нипкова, так что на фотослой за каждой линзой раstra приходится один оборот диска (экспозицию) засвечивается десять дуг концентрических окружностей (дорожек экспонирования). Шаг этих дорожек

В английской камере используется ортогональный линзовый раскрасочный механизм, в отечественной — цилиндрический. В английской камере постоянна и определяется числом оборотов диска Нипкова, так что на фотослой за каждой линзой раstra приходится один оборот диска (экспозицию) засвечивается десять дуг концентрических окружностей (дорожек экспонирования). Шаг этих дорожек

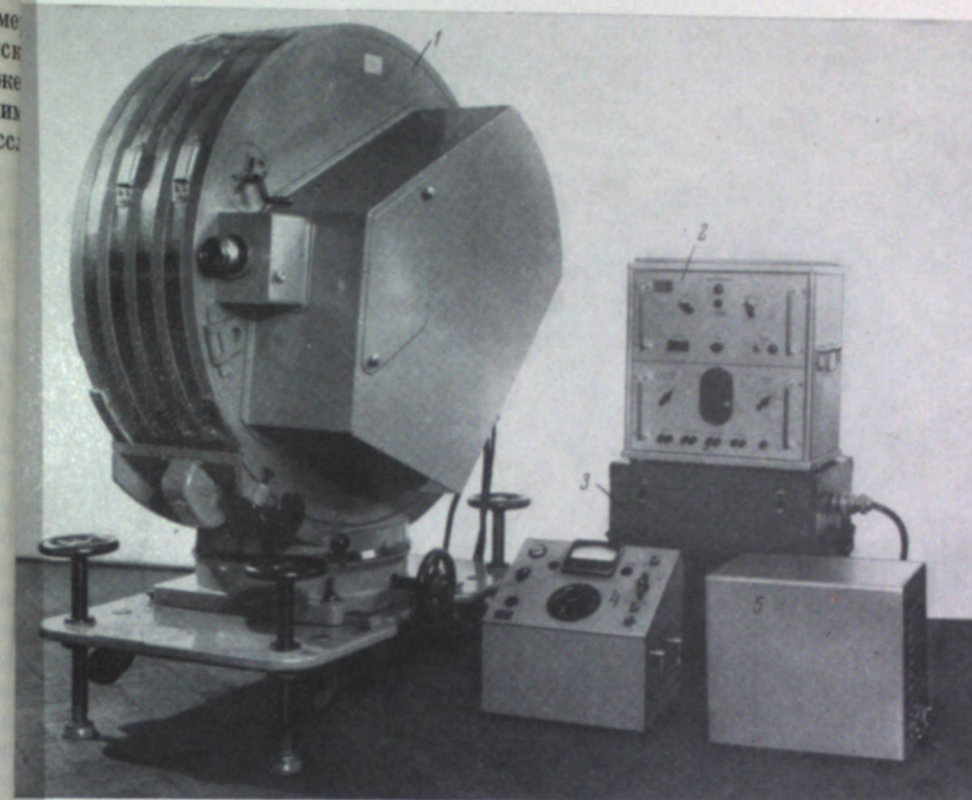
В английской камере используется ортогональный линзовый раскрасочный механизм, в отечественной — цилиндрический. В английской камере постоянна и определяется числом оборотов диска Нипкова, так что на фотослой за каждой линзой раstra приходится один оборот диска (экспозицию) засвечивается десять дуг концентрических окружностей (дорожек экспонирования). Шаг этих дорожек

В английской камере используется ортогональный линзовый раскрасочный механизм, в отечественной — цилиндрический. В английской камере постоянна и определяется числом оборотов диска Нипкова, так что на фотослой за каждой линзой раstra приходится один оборот диска (экспозицию) засвечивается десять дуг концентрических окружностей (дорожек экспонирования). Шаг этих дорожек

исключено, так как перемещение отверстий диска Нипкова по окружностям полностью исключает использование одновременно двух отверстий, расположенных по горизонтали.

Отечественная растровая камера РКС-2, выпущенная после камеры РКС-1, имеет приблизительно те же частоты съемки, что и английская камера серии 600; она также является камерой ждущего типа и снабжена затвором; габариты ее невелики. Камера РКС-2 имеет больше преимуществ перед камерой серии 600 и найдет широкое применение при исследовании быстропротекающих процессов.

К ст. И. И. Крыжановского,
стр. 23.



Комплект камеры CCKC-4.

1 — камера CCKC-4 на штативе; 2 — прибор для синхронизации; 3 — блок конденсаторов; 4 — пульт управления; 5 — тиратронный блок питания затвора.

К ст. С. М. Проворнова и др.,
стр. 28.

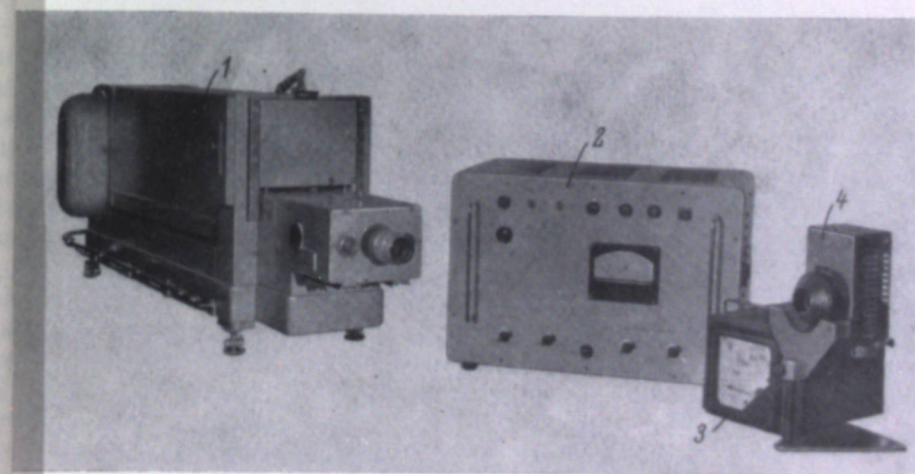


Рис. 2. Общий вид комплекта камеры РКС-2.

1 — камера РКС-2; 2 — пульт управления РПУ-2; 3 — автотрансформатор; 4 — фонарь освещения объекта съемки.

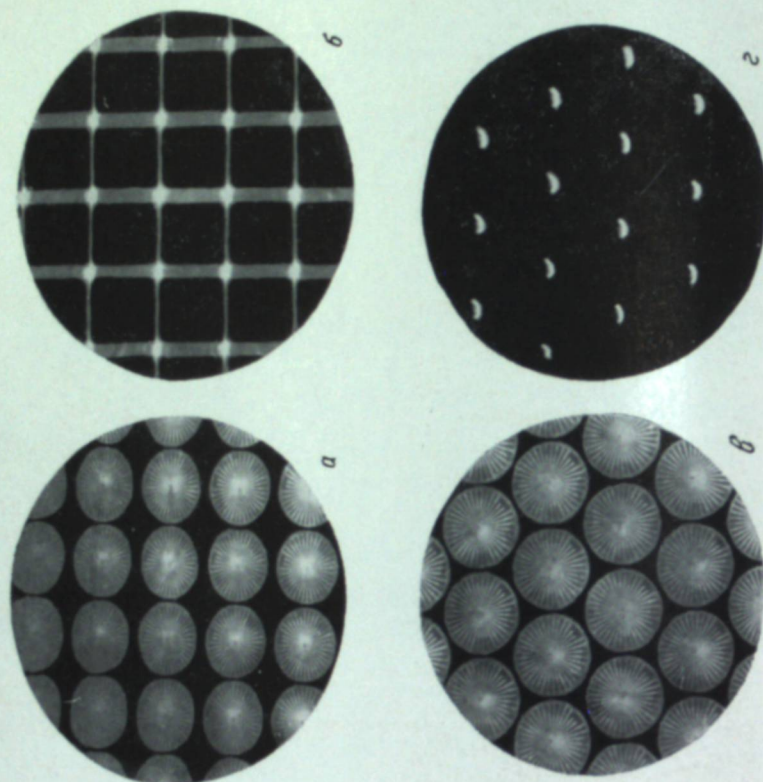
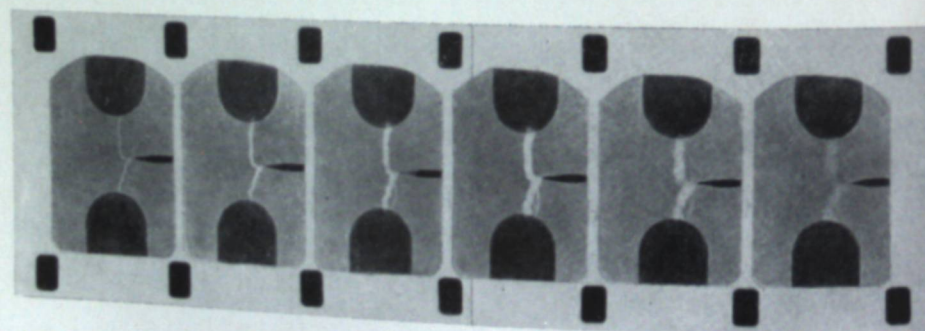


Рис. 3. Микрофотографии изображений, даваемых линзами раstra французского производства (сверху) и изготовленного в НИКФИ (снизу).



Н. А. ВАЛЮС, Г. С. АРУШАНОВ,
В. П. ГЕНЕРАЛОВА

СКОРОСТНОЙ ФОТОРЕГИСТРАТОР С ВОЛОКОННОЙ ОПТИКОЙ И ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Скоростной фоторегистратор с волоконной оптикой и электронно-оптическим преобразователем предназначен для скоростной съемки астропотекающих процессов, невоспринимаемых нормальным человеческим зрением. Предлагаемый рассмотрению скоростной фоторегистратор отличается от известных скоростных кино съемочных камер фоторегистраторов своей конструкцией, способом разложения снимаемого кадра и способом перемещения разложенного кадра по светочувствительному материалу.

Новый метод разложения снимаемого кадра в строку и применение оригинального метода перемещения строки по светочувствительному материалу позволяет заснять (как показывают расчетные данные) до 10^6 кадров/сек. Это превышает возможности всех существующих в мире как скоростных кино съемочных камер, так и скоростных фоторегистраторов. В настоящее время известно, что самый эффективный скоростной кино съемочный аппарат РКС-2, разработанный в Ленинградском институте киноинженеров, позволяет заснять до $5 \cdot 10^4$ кадров/сек.

Скоростной фоторегистратор с волоконной оптикой и электронно-оптическим преобразователем состоит из следующих частей: оптической системы, изображающей снимаемый предмет на входном зрачке оптической ячейки, оптической ячейки, электронно-оптического преобразователя для перемещения изображения снимаемого предмета по светочувствительному материалу и светочувствительного материала — фотографической пластинки, кино пленки и др. Структурная схема скоростного фоторегистратора представлена на рис. 1. Снимаемый предмет O объективом L изображается во входном зрачке оптической ячейки $Я$. При помощи оптической ячейки снимаемое изображение, спроецированное объективом во входном зрачке ячейки с нормальным отношением сторон кинокадра 3 : 4, преобразуется в одну большую строку с толщиной, равной толщине оптических стеклянных волокон, из которых изготовлена оптическая ячейка. Строчное изображение кадра попадает на светочувствительный экран электронно-оптического преобразователя $П$, на входном экране которого получается это же строчное изображение снимаемого предмета.

Подавая специальные электрические сигналы развертки на электронно-оптический преобразователь с генератора $Г$, можно строчное изображение перемещать по экрану со скоростью частоты сигнала развертки до 10^6 строк/сек.

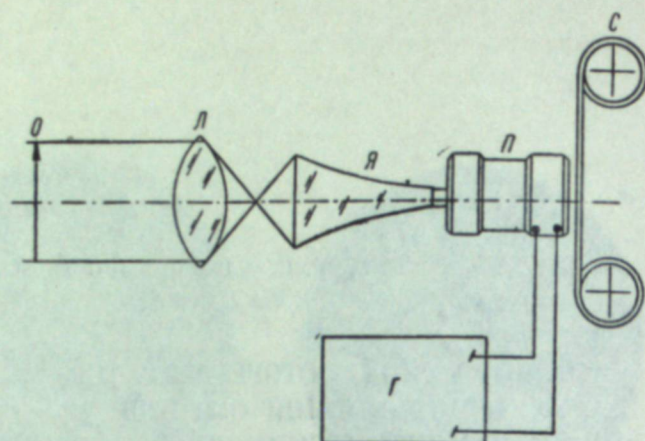


Рис. 1. Структурная схема скоростного фоторегистратора с волоконной оптикой и электронно-оптическим преобразователем.

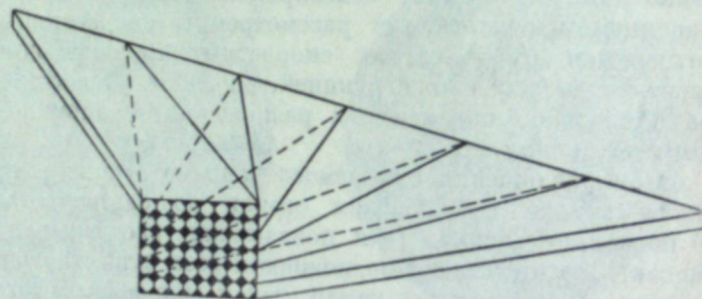


Рис. 2. Устройство оптической ячейки скоростного фоторегистратора с волоконной оптикой.

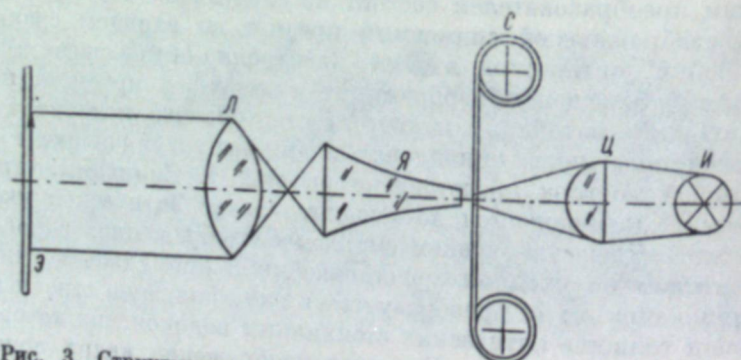


Рис. 3. Структурная схема расшифровщика (видоизмененного фоторегистратора), приспособленного для восстановления заснятого фотографического изображения.

Строчные изображения с выходного экрана электронно-оптического преобразователя падают на светочувствительный материал С, где и фиксируются в виде фотографических изображений строк. Количество зафиксированных на фотослое строк будет определяться скоростью перемещения окули на выходном экране электронно-оптического преобразователя. Последний является электронным прибором, и скорость перемещения окули по экрану прибора будет зависеть от инерционности фотоэлектрического слоя. Отечественные электронно-оптические преобразователи работают при сигналах развертки до 10^{10} периодов в секунду; следовательно, при помощи скоростного фоторегистратора с волоконной оптикой электронно-оптическим преобразователем можно заснять до 10^6 кадров/сек.

Как уже отмечалось выше, одним из основных элементов рассматриваемого скоростного фоторегистратора, отличающегося от известных оригинальностью конструкции, является оптическая ячейка, которая состоит из множества стеклянных волокон, склеенных в определенной последовательности. Каждое стеклянное волокно представляет собой оптический волновод (светопровод), передающий световую точку без существенных потерь яркости. Луч, наклоненный к оси волокна, передается по волокну путем полных внутренних отражений от поверхности сердцевины.

Диаметр действующего отверстия стеклянного волокна, используемого нами, порядка 30 мк, внешний диаметр около 60—80 мк. Если стеклянные волокна расположить в определенной последовательности на входе оптической ячейки, так чтобы группа стекловолокон составила бы подобие телевизионной строки, а несколько строк — кадр, то можно получить точки на другом конце светопровода, из которых состоит нормальный кадр, расположить в любом порядке. Стекловолокно, из которого изготавливается оптическая ячейка, механически достаточно прочное. Его можно резать, сгибать и даже связывать узлом. В оптической ячейке, применяемой в скоростном фоторегистраторе, стекловолокна расположены на входе ячейки в виде строчек, расположенных друг под другом. На выходе оптической ячейки эти же строки расположены в другом порядке: одна за другой, образуя одну большую строку толщиной, равной толщине наружного диаметра стекловолокна, из которого изготовлены строки. За первой верхней строкой установлена вторая, за второй третья и т. д. Схема расположения строчек из стекловолокна в оптической ячейке показана на рис. 2. В результате этого проецируемое оптическое изображение предмета на входное отверстие оптической ячейки раскладывается на элементарные точки, равные диаметру стекловолокна. Элементарные точки изображения сложены в строки, а на выходе оптической ячейки строки изображения располагаются не одна под другой, а в одну линию, образуя одну большую строку проецируемого изображения. Если пользоваться в оптической ячейке стекловолокном с наружным диаметром, равным 60 мк, и в каждой строке собрать их по 40 штук, то длина одной строки будет $60 \text{ мк} \times 40 = 2400 \text{ мк}$. Нормальный кадр имеет соотношение высоты к ширине, равное 3 : 4, так что при использовании нормального телевизионного кадра придется применить 30 таких строк. Длина одной строки в этом случае будет: $2.4 \text{ мм} \times 30 = 72 \text{ мм}$.

Если такую строку проецировать на фотографическую пластинку размером $90 \times 120 \text{ мм}$ при толщине каждой строки примерно 30 мк, то на такой пластине можно расположить свыше 3000 строк.

Зафиксированные на светочувствительном слое строки в виде скрытого изображения проявляются обычным порядком. На фотографическом слое будут расположены кадры заснятого изображения, вытянутые в одну строку. В каждой строке зафиксирована фаза быстропротекающего процесса.

Для того чтобы за ним можно было проследить, процесс восстанавливается обратным порядком. Структурная схема расшифровщика приведена на рис. 3. Основной частью расшифровщика является оптическая ячейка, используемая в скоростном фоторегистраторе.

Расшифровщик состоит из источника света — И, цилиндрической линзы — Ц, фотоматериала с заснятыми в виде строк кадрами быстропротекающего процесса — С, оптической ячейки — Я, объектива — экрана или же системы для перепечатывания кадров — Э.

При помощи цилиндрической линзы Ц свет от лампы И проецируется в виде строки на фотоматериал с изображениями. Строчное изображение заснятого кадра падает на строку оптической ячейки расшифровщика на выходе которого получается кадр изображения с нормальным отношением сторон 3 : 4. При достаточной яркости это изображение можно быть спроектировано на экран или же на светочувствительный материал в зависимости от необходимости. Последовательно просвечивая строки, можно просмотреть или перепечатать все фазы заснятого быстропротекающего процесса.

Перепечатывая таким образом кадр за кадром, можно построить фильм о заснятом быстропротекающем процессе. Демонстрируя фильм с меньшей скоростью изменения кадров, с тем чтобы можно было бы обычным зрением наблюдать процессы изменения фаз, можно быстро протекающие процессы рассмотреть с нормальной скоростью.

Такое устройство фиксации и расшифровки быстропротекающего процесса позволит с достаточной точностью изучить явления в природе, которые невозможно наблюдать обычным зрением.

Выводы

В статье рассматривается скоростной фоторегистратор с волоконно-оптической и электронно-оптическим преобразователем, позволяющий с высокой скоростью регистрировать процессы с частотой смены кадров до 10^{10} в секунду. Такое число кадров в секунду удается снять благодаря применению специальной оптической ячейки, изготовленной из оптических волокон и электронно-оптического преобразователя.

Л. В. АКИМАКИНА, С. П. ИВАНОВ,
Д. Ф. ИВЧЕНКО, П. К. СКОРОБОГАТОВ

СКОРОСТНАЯ СТЕРЕОКИНОСЪЕМКА С ПЕРЕМЕННЫМ БАЗИСОМ КАМЕРОЙ СКС-1

При исследовании некоторых скоростных физических процессов требуется выявить характер поведения и распространения отдельных частиц в пространстве. Наиболее полное представление о быстропротекающем процессе можно получить при стереоскопическом исследовании процесса, в котором исследуемое явление происходит. К таким процессам относятся различные виды горения, плавления, течения жидкости и т.д.

В данном сообщении приводится методика скоростной стереоскопической киносъемки камерой СКС-1 и описывается оборудование для стереоскопического рассматривания замедленной картины скоростного процесса.

Съемка камерой СКС-1 производилась с частотой 4000—5000 кадров/сек. киноплёнку МЗ-2. Исследования ставили целью выяснить пространственную картину поведения частиц и процесса горения пламени.

Одновременное фиксирование двух точек зрения при съемке одним объективом осуществлялось с помощью двухзеркальной приставки, помещенной на определенном расстоянии S_2 (рис. 1) от главной плоскости объектива камеры.

Двухзеркальная приставка представляет собой пару зеркал n_1, n_2 и m_2 наружного покрытия размером $120 \times 150 \times 8$ мм, расположенных под углом $\sim 45^\circ$ к оптической оси объектива камеры.

Использование двухзеркальной приставки к камере СКС-1 позволяет довольно простыми средствами осуществить скоростную стереосъемку рассматриваемого процесса. Изменение расстояния S_2 от стыка зеркал до главной плоскости объектива позволяет плавно менять величину базиса стереосъемки, определяемого расстоянием O_1O_2 между мнимыми изображениями объективов по формуле

$$S_2 = \frac{Bf}{q},$$

где B — базис стереосъемки, q — расстояние между центрами кадров стереопары, f — сопряженное фокусное расстояние объектива камеры.

Величина базиса стереосъемки зависит от расстояния, с которого производится съемка, и вычисляется по известной формуле

$$B = \frac{S_1 p_i}{f}.$$

Здесь p_i — параллакс точек бесконечности на пленке. Для рассматривания полученных изображений стереопары на экране необходимо, чтобы при съемке, так и при проекции. В этом случае на экране полностью исключаются искажения, вносимые двухзеркальной приставкой, помещенной перед одним объективом.

$$S_2 = S_1 \frac{p_i}{q}$$

Если размер обычного кадра на 16-мм киноплёнке равен 10.5×7.6 мм, то при стереоскопической съемке оба кадра стереопары размещаются на этой же площади. Размер каждого кадра стереопары при этом оказывается

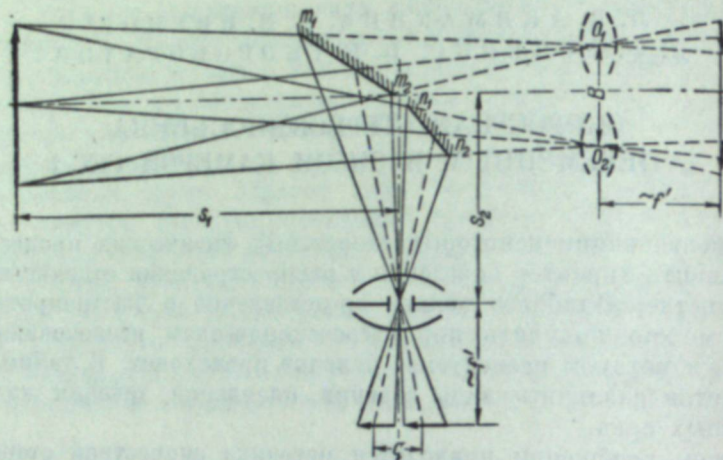


Рис. 1. Схема двухзеркальной стереоприставки к камере СКС-1.

равным 7.5×4.5 мм, а перемычка между кадрами стереопары — 1.5 мм. При этих данных величина $q = 6$ мм.

Стереосъемка камерой рассчитывалась для условий рассматривания полученных изображений на растровом стереоэкране (изготовлен в НИКФИ), размером 1.2×1.25 м, который был установлен в зале размером 6×10 м (25—30 зрителей). При такой проекции $k = \frac{1250}{7.5} = 166$ и параллакс точек бесконечности на пленке $p_i = 0.39$ мм. Представив эти данные, получаем, что для $S_1 = 3$ м $S_2 = 195$ мм.

На рис. 2 (см. вклейку, стр. 48) приведены фотографии (стереопара изображений) исследуемого пламени, снятого с частотой 4000 кадров/сек.

При пользовании зеркальной приставкой следует иметь в виду, что размеры перемычки между зеркалами должны быть согласованы с величиной промежутка между кадрами стереопары на пленке. Если это условие не выполняется, то возможно получение паразитной засветки по краям кадров стереопары. Весьма эффективно в этом случае использование правой диафрагмы в съемочном объективе камеры.

Проекция полученных изображений на растровый стереоэкран осуществлялась 16-мм кинопроектором с двухзеркальной приставкой, аналогичной съемочной. Проекционная приставка, так же как и съемочная, имеет регулировочные винты горизонтального и вертикального параллелизма и отличается тем, что устанавливается на постоянном расстоянии от объектива проектора. Удаление стыка зеркал проекционной приставки от объектива проектора выбирается из условий обеспечения базиса для ряды наблюдателей обеспечиваются зонами стереоскопии для правого и левого глаз.

Выводы

Описанная методика скоростной стереосъемки камерой СКС-1 с двухзеркальной приставкой и проекция на растровый стереоэкран дали удовлетворительные результаты при исследовании процесса горения и движения частиц, обладающих высокой интенсивностью свечения, и могут быть рекомендована в других областях исследований.

А. Б. ГРАНИГГ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАСЧЕТА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КАМЕР С ЗЕРКАЛЬНОЙ РАЗВЕРТКОЙ

Высокоскоростные камеры с зеркальной разверткой получили в настоящее время широкое распространение. В статье рассматриваются некоторые общие вопросы теории расчета указанных камер, представляющие практический интерес.

1. Выбор схемы зеркальной развертки

В Институте химической физики Академии наук СССР при участии Г. Л. Шнирмана, А. С. Дубовика и автора статьи проводилась работа по изучению ждущих систем для высокоскоростных камер с зеркальной разверткой. Нетрудно убедиться в том, что зеркальная развертка ждущего типа, т. е. система, не требующая синхронизации начала фотографического процесса с определенным положением зеркала, может быть осуществлена на основе развертывающего устройства с любым числом отражающих граней. Рабочий угол системы γ изменяется в зависимости от числа отражающих граней m по формуле

$$\gamma = \frac{720^\circ}{m}.$$

Таким образом, для одной отражающей грани рабочий угол системы $\gamma = 720^\circ$; для двух граней (плоскопараллельное зеркало с двухсторонним зеркальным покрытием) $\gamma = 360^\circ$; для трехгранного зеркала $\gamma = 240^\circ$ и т. д.

Однако для осуществления этих систем необходимо построить несколько оптических вводов, направляющих световые пучки на развертывающее зеркало, и производить запись в нескольких рабочих секторах, так как от одного ввода невозможно произвести запись в секторе, превышающем 180° . Например, для плоскопараллельного зеркала с двумя гранями ($\gamma = 360^\circ$) необходимо иметь два ввода с рабочими секторами 180° каждый или три ввода с секторами по 120° и т. д.

Несколько вводов можно осуществить независимо друг от друга, располагая в ряд одинаковые оптические системы. Но в этом случае при небольших расстояниях от объекта съемки до камеры между отделенными рядами изображений возникает параллакс, и возможно даже частичное срезание кадра (при малом угле поля зрения камеры и большом фокусном расстоянии). Другой путь заключается в разделении светового пучка, вошедшего в камеры через один объектив, на ряд независимых

пучков, например с помощью системы полупрозрачных зеркал. Однако это ведет к падению светосилы прибора.

При большом числе вводов требуется на одной общей оси вращения юлагать несколько развертывающих зеркал. В высокоскоростной камере эти зеркала должны вращаться с большой скоростью (40—60 тыс. об./мин.) Вращение с высокой скоростью длинного вала с несколькими зеркалами является сложной задачей.

В некоторых случаях бывает необходимо строить схему зеркальной развертки с наклонными вводами. Например, схема ждущей развертки с трехгранным зеркалом с двумя вводами и с двумя рабочими секторами 20° возможна только при использовании наклонных пучков. При этом оптические оси вводов не перпендикулярны оси вращения зеркала. Обычно угол наклона не превышает $5-10^\circ$. Введение наклонных пучков возможно, однако, с некоторыми усложнениями конструкции камеры.

Таким образом, при выборе схемы зеркальной развертки целесообразно строить систему более чем с двумя вводами и с двумя зеркалами, расположенными на общей оси вращения. Расстояние между оптическими осями вводов на входе системы должно быть минимальным. Предпочтительнее работать с прямыми пучками, т. е. оптические оси вводов должны быть перпендикулярны оси вращения зеркала. Кроме того, развертывающее устройство должно обеспечивать большой рабочий угол γ .

2. Определение основных характеристик прибора

При определении основных характеристик прибора целесообразно пользоваться значениями радиуса развертки R , характеризующего габариты камеры, промежуточного изображения b_1 , расположенного в районе развертывающего зеркала, и кадра b_2 . Тогда получим следующие зависимости.

а) Частота съемки

$$\nu = \frac{\pi}{15} \frac{Rn}{b_2} k \cdot u \left[\frac{\text{кадр.}}{\text{сек.}} \right], \quad (2)$$

б) Эффективное время экспонирования одного кадра

$$t_{\text{эф}} = \frac{q}{\nu} [\text{сек.}]. \quad (3)$$

Здесь n — число оборотов зеркала в мин.; коэффициент q — отношение эффективного времени экспонирования к периоду смены кадров, т. е. скважность, или отношение ширины малой линзы к шагу по линзовой вставке ($q \leq 1$); коэффициент u — отношение ширины кадра b_2 к шагу по фокальной дуге ($u \leq 1$); k — число рядов в линзовой вставке. Число рядов бывает от одного до четырех.

в) Число фотографируемых кадров

$$P = \frac{4\pi R}{b_2 m} k \cdot u, \quad (4)$$

где m — число зеркальных граней развертывающего устройства.

г) Полное время фотографической регистрации

$$T = \frac{60}{n \cdot m} [\text{сек.}]. \quad (5)$$

д) Относительное отверстие оптической системы в плоскости, перпендикулярной оси вращения зеркала,

$$\frac{2a^1}{f^1} = \frac{b_1}{R} \frac{q}{ku}. \quad (6)$$

д) Ширина малой линзы в линзовой вставке

$$a = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot q}{b_1 + b_2 \cdot k u} \text{ [мм]}.$$

Размер малой линзы в плоскости, параллельной оси вращения зеркала в случае многорядной линзовой вставки, определяется по формуле

$$a' = \frac{r_1}{R} (b'_2 + n_x) - n_x$$

где r_1 — радиус линзовой вставки, b'_2 — размер кадра, n_x и n_x — межотки между рядами кадров и рядами линз соответственно.

В большинстве случаев линзы во вставках и кадры по фокальным дугам располагаются вплотную друг к другу, т. е. коэффициенты q равны единице. Часто применяют однорядную линзовую вставку, $k=1$. В этих случаях указанные формулы принимают более простой вид. Приведенные формулы позволяют независимо друг от друга определить основные характеристики прибора, задаваясь величинами R , b_1

3. Размеры разворачивающего зеркала

Рассмотрим схему ждущей развертки на основе зеркального многогранника с двумя вводами и с двумя рабочими секторами по $\left[\frac{360^\circ}{m} \right]$ рис. 1 изображены зеркальные многогранники в двух крайних положениях, соответствующих началу и концу записи в рабочем секторе.

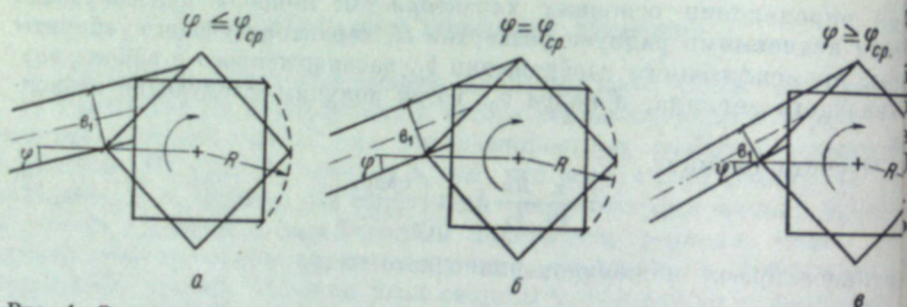


Рис. 1. Зеркальные многогранники в двух крайних положениях, соответствующих началу и концу записи в рабочем секторе.

ниях, соответствующих началу и концу записи в рабочем секторе. В зависимости от величины угла φ между направлением ввода и перпендикуляром к грани зеркала в начальном положении здесь возможны три случая (а, б и в).

В случае а ($\varphi \leq \varphi_{ср}$) радиус окружности, описанной вокруг многогранника, определяется выражением

$$R = \frac{b_1}{2 \sin \frac{90^\circ}{m} \cos \left[\frac{90^\circ}{m} + \varphi \right]},$$

где b_1 — размер промежуточного изображения, m — число граней многогранника.

В случае б ($\varphi = \varphi_{ср}$). Тогда

$$R = \frac{b_1}{2 \sin \frac{180^\circ}{m} \cos \left[\frac{180^\circ}{m} + \varphi \right]}.$$

В случае в ($\varphi \geq \varphi_{ср}$) справедливы оба выражения.

начение $\varphi_{ср}$ определяется зависимостью

$$\varphi_{ср} = \arctg \left[\frac{1 - \cos \frac{180^\circ}{m}}{\sin \frac{180^\circ}{m}} \right] + 90^\circ \left(1 - \frac{4}{m} \right) \quad (11)$$

числяется для любого значения m . Например, для четырехгранника $\varphi_{ср} = 22^\circ 30'$, для пятигранника $\varphi_{ср} = 36^\circ$ и т. д.

Обычно величина угла ввода φ меньше $\varphi_{ср}$ и для определения габаритов зеркала необходимо пользоваться формулой (9).

Таким образом, размеры разворачивающего зеркала прямо пропорциональны величине промежуточного изображения b_1 , числу граней m

угла ввода φ . Желая иметь в высококачественной камере небольшое зеркало, необходимо при расчете задаваться минимальной величиной b_1 , согласовывая ее с требованиями к светосиле прибора (6), и малым углом m . Угол ввода φ также должен быть минимальным.

Следует, однако, рассмотреть зависимость угла φ и положением компонента оптической системы, расположенного непосредственно перед разворачивающим зеркалом (обычно это коллектив). На рис. 2 изображены коллектив К, промежуточное изображение b_1 , расположенное в районе разворачивающего зеркала З, и крайняя линза линзовой вставки Л. При рассмотрении рис. 2 можно установить следующее равенство

$$S'_K \sin 2\varphi - \left[S'_K \frac{a+b_1}{2r_1} + \frac{b_1}{2} + l \right] \cos 2\varphi = \frac{a+b_1}{4}, \quad (12)$$

S'_K — расстояние от коллектива К до промежуточного изображения b_1 , φ — угол ввода, a — ширина малой линзы, r_1 — радиус линзовой вставки, l — толщина оправы коллектива К ($l=5-6$ мм). В этом равенстве изложены все величины, кроме S'_K и φ , т. е. оно устанавливает зависимость между S'_K и φ .

Коллектив К должен находиться как можно ближе к промежуточному изображению. Удаление его ведет к значительному увеличению фокусного расстояния переднего объектива (при заданном фокусном расстоянии камеры), к росту габаритов оптической системы в длину, а также к необходимости усложнять конструкцию коллектива вследствие роста светосилы. Но, как видно из рис. 2, установка коллектива К вблизи промежуточного изображения вызывает увеличение угла ввода φ .

Таким образом, требования к величине угла φ , исходящие из необходимости иметь разворачивающее зеркало малых размеров и поместить коллектив как можно ближе к промежуточному изображению, взаимно противоречивы и при расчете следует находить разумный компромисс между ними.

При использовании плоскопараллельного зеркала с двумя гранями размер грани также прямо пропорционален величине b_1 и углу ввода φ .

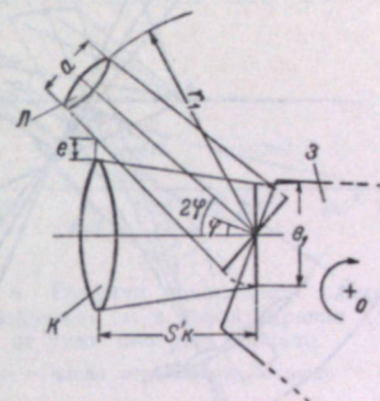


Рис. 2.

К — коллектив; b_1 — промежуточное изображение; З — разворачивающее зеркало; Л — крайняя линза линзовой вставки.

4. Влияние сдвига изображения на разрешающую способность

При построении схемы зеркальной развертки на основе многогранного зеркала или плоскопараллельного зеркала с двумя рабочими гранями ось вращения зеркала O не может проходить через отражающую грань и отстоит от нее на расстоянии R (рис. 3). При вращении зеркала точка отражения T перемещается вдоль оптической оси. Промежуточное изображение A , построенное предыдущей оптической системой, в этом случае не совпадает с точкой отражения. Поэтому изображение точки A в зеркале не будет неподвижным, но при вращении зеркала будет перемещаться по внутренней ветви улитки Паскаля [1], участком которой $A_1'A_2'$, соответствующий повороту зеркала за время экспонирования одного кадра, изображен на рис. 3. Перемещение отраженного зеркала промежуточного изображения ведет к сдвигу и дефокусировке изображения, построенного малыми линзами на пленке, т. е. к падению разрешающей способности.

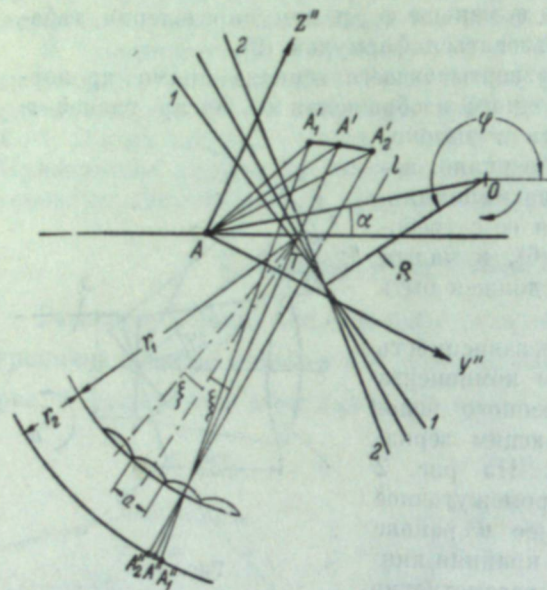


Рис. 3. Схема смещения изображения по внутренней ветви улитки Паскаля за время экспонирования одного кадра

$$\text{Дефокусировка } \Delta z'' = \{[2l \cos(\varphi_1 - \alpha) + 2R] \cos \varphi_2 - [2l \cos(\varphi_2 - \alpha) + 2R] \cos \varphi_1\} \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2.$$

Здесь φ — угол, определяющий положение зеркальной грани; $\varphi_1 = \varphi_{\text{ср}} + \frac{\xi}{2}$, $\varphi_2 = \varphi_{\text{ср}} - \frac{\xi}{2}$, где ξ — угол поворота зеркала за время экспонирования одного кадра $\xi = \arctg \frac{a}{r_1}$.

Нами было исследовано изменение величины сдвига и дефокусировки изображения в зависимости от числа граней развертывающего зеркала в схеме с двумя вводами и двумя рабочими секторами. При этом величина промежуточного изображения b_1 , радиус линзовой вставки r_1 , внутреннее увеличение системы $\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$ и размер малой линзы a во всех случаях оставались постоянными. Положение промежуточного изображения выбиралось таким образом, чтобы получить величины сдвига по краям рабочего сектора одинаковые по абсолютной величине, но разные по знаку. Результаты представлены на графиках рис. 4. Из рассмотрения графиков видно, что величина сдвига изображения — наибольшая на краях рабочего сектора — не зависит от числа отражающих граней. Величина дефокусировки изображения мала, лежит в пределах глубины резкости оптической системы, и влиянием ее на разрешающую способность

изображению с влиянием сдвига можно пренебречь. Поворот изображения во время экспонирования одного кадра также ничтожно мал и не влияет на разрешающую способность.

Таким образом, величина сдвига зависит 1) от размера промежуточного изображения b_1 , определяющего габариты зеркального многогранника (9), т. е. удаление отражающей грани от оси вращения; 2) от величины угла поворота зеркала за время экспонирования одного кадра — $\arctg \frac{a}{r_1}$; 3) от внутреннего увеличения системы зеркала-пленка.

В общем случае величина сдвига зависит также от размера рабочего сектора.

Падение разрешающей способности, вызываемое сдвигом изображения, препятствует повышению светосилы прибора, т. е. увеличению радиуса малой линзы a . Светосила может быть увеличена при использовании плоскопараллельного зеркала с двумя рабочими гранями, так в этом случае существенно уменьшается удаление грани от оси вращения, определяемое здесь как половина толщины зеркала. Но невозможность сделать зеркало бесконечно тонким ставит и тут определенные пределы для светосилы.

Вопрос о сдвиге и дефокусировке изображения полностью снимается, если ось вращения зеркала проходит через отражающую грань. Разрешающая способность при этом определяется только aberrациями оптической системы и дифракционными явлениями в световом затворе. Такая система не сбалансирована относительно своей оси, и вращение с высокой скоростью (60–80 и более тыс. об./мин.), а также применение здесь в качестве привода скоростных малогабаритных турбинок является трудной задачей.

5. Выбор оптической системы камеры

В зависимости от назначения камеры и требований, предъявляемых к ней, оптическая схема камеры может быть построена по-разному. Одной из простейших является схема, изображенная на рис. 5, а. Объектив O_1 проецирует промежуточное изображение b_1 объекта съемки в районе развертывающего зеркала. Малыми линзами МЛ это изображение переносится на пленку П. Задаваясь фокусным расстоянием камеры f_k , определяем фокус объектива f_1 и положение входного зрачка $S_{\text{вх}}$

$$f_1 = f_k \frac{r_1}{r_2}, \quad (15)$$

$$S_{\text{вх}} = f_1 \left(\frac{f_1}{r_1} + 1 \right). \quad (16)$$

В других схемах — более сложных в построении промежуточного изображения b_1 — участвует, кроме объектива O_1 , коллектив K_2 , основной функцией которого является построение изображения входного зрачка системы на малых линзах МЛ для осуществления светового затвора. Сходными для расчета служат уравнения, определяющие 1) приведенное фокусное расстояние камеры f_k в зависимости от параметров

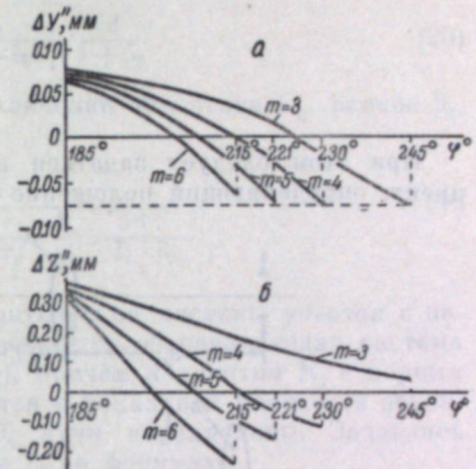


Рис. 4. Графики зависимости сдвига изображения (а) и дефокусировки (б) от угла поворота зеркала. m — число отражающих граней.

системы и 2) оптическую силу коллектива K_2 , необходимую для того, чтобы изображение на зеркале и выходного зрачка совпадало с фокусным расстоянием первого объектива f_1 и расстоянием d , определяющими габариты системы, и вести расчет по формулам

Схема, изображенная на рис. 5, б, рассчитывается по формулам

$$d = \frac{[f_k k \frac{r_1}{r_2} + S'_K (1 - k)] (S'_K + r_1)}{r_1 k},$$

$$f_1 = \frac{d}{1 - \frac{S'_K}{f_k} \frac{r_2}{r_1}}.$$

При этом следует задаться величинами f_k и k . Здесь k — коэффициент, определяющий положение изображения выходного зрачка

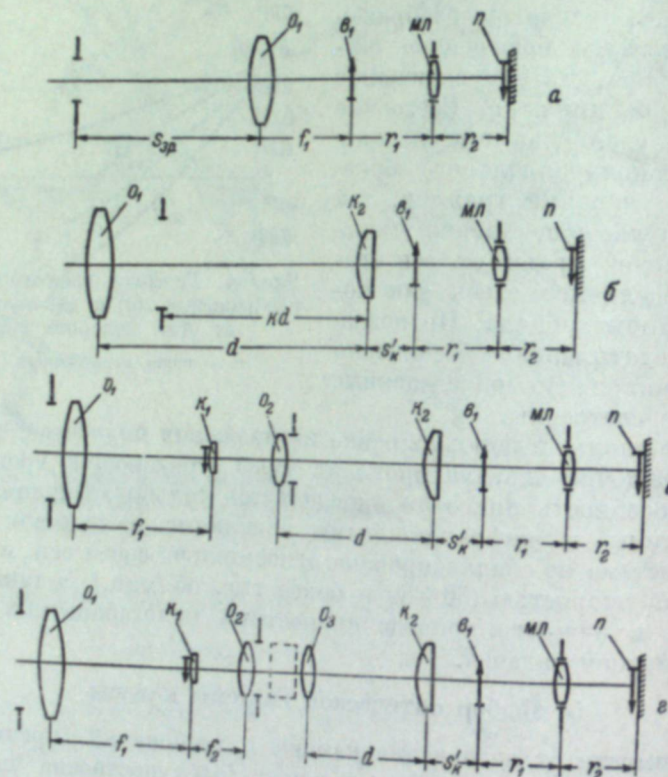


Рис. 5. Оптические схемы камер.

в относительном ходе через коллектив K_2 . В частном случае при $k=1$ это изображение совпадает с объективом O_1 . Тогда

$$d = \frac{f_k (S'_K + r_1)}{r_2}.$$

Если $k > 1$, изображение выходного зрачка находится перед объективом O_1 ; если $k < 1$ — зади него. Предполагается, что величины r_1 и r_2 известны из предыдущих разделов расчета.

Схема в на рис. 5 отличается от схемы б введением объектива O_1 в плоскости коллектива K_1 . Промежуточное изображение, построенное объективом O_1 совместно с коллективом K_2 в район развернутого зеркала. В этом случае, кроме величин f_k и k , необходи-

$$\beta_2 = \frac{\frac{r_1}{r_2} \frac{f_k}{S'_K}}{f_1 \left[\frac{r_1}{S'_K (S'_K + r_1)} - \frac{1}{kd} \right]}, \quad (19)$$

$$f_2 = \frac{S'_K}{f_k} \frac{r_2}{r_1} f_1 \frac{\beta_2}{1 + \beta_2} + \frac{d}{1 + \beta_2}. \quad (20)$$

Иногда удобнее бывает задать увеличение объектива O_2 , равное β_2 , и находить d по формуле

$$d = \frac{\frac{1}{k}}{\frac{r_1}{S'_K (S'_K + r_1)} - \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{f_k}{S'_K} \cdot \frac{1}{f_1 \cdot \beta_2}}. \quad (19')$$

Нередко нужно получить внутри оптической системы участок с параллельным ходом лучей. Тогда применяется оборачивающая система двух объективов O_2 и O_3 (рис. 5, г), причем коллектив K_1 с первым промежуточным изображением находится в фокальной плоскости объектива O_2 . Между объективами O_2 и O_3 лучи параллельны. Задаваясь величинами f_k , f_1 , d и k , находим f_2 и f_3 по формулам

$$f_3 = \frac{1}{\frac{r_1}{S'_K (S'_K + r_1)} - \frac{1}{kd}} + d, \quad (21)$$

$$f_2 = f_1 \frac{S'_K}{f_k} \frac{r_2}{r_1} \frac{f_3}{f_3 - d}. \quad (22)$$

Приведенные формулы содержат ряд постоянных коэффициентов и тому удобны при расчетах, позволяя быстро находить оптимальное решение для каждой схемы.

Созданные в ИХФ приборы СФР [4] и ЛВ-1 [5] построены соответственно по схемам б и г.

ЛИТЕРАТУРА

- А. С. Дубовик, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 2, 293, 1957.
- А. С. Дубовик, УНФ, VI, 102, 1959.
- А. С. Дубовик, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 4, 226, 1959.
- Г. Л. Ширман, А. С. Дубовик, П. В. Кевлишвили. Высоко-скоростная фоторегистрирующая установка СФР. Изд. Инст. техн.-экон. информ. АН СССР, 1957.
- А. С. Дубовик, П. В. Кевлишвили, Г. Л. Ширман, Журн. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 4, 12, 1959.

Е. А. ТАРАНТОВ

К РАСЧЕТУ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СЪЕМОЧНЫХ КАМЕР С НЕПРЕРЫВНОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ РАЗВЕРТКОЙ

Вследствие того что в настоящее время исследования быстротекающих газодинамических процессов не обеспечены в должной мере качественной киноаппаратурой, представляется интересным рассмотреть возможные схемы камер для газодинамического эксперимента. Предъявляются следующие требования: ждущий тип, частота съема 500—600 тыс. кадров/сек., разрешение 25 линий/мм при 35-мм кассете, количество кадров порядка 200. Необходимость совместной работы с пирометрами или интерферометрическими приборами, визуализирующими газовые потоки, требует наименьшего количества зрачков входа. Достаточно (для необходимого диапазона измеряемых градиентов скорости) светосилы и расположения разворачивающего элемента (вблизи от него находится промежуточное изображение объекта) в вакууме.

Анализ ряда схем камер показал, что этим условиям, кроме разрешающей способности, удовлетворяет схема с удвоением скорости светопучки при помощи зеркальной развертки, где отражающие поверхности не совпадают с осью вращения.

Рассмотрим подробнее зависимость разрешающей способности от расстояния между осью вращения и отражающей поверхностью зеркала.

Из рис. 1 разрешение для осевой точки кадра приближенно выражается как

$$\rho = \frac{1}{kS_g + r_0},$$

где $1/r_0$ — разрешение оптики и фотослоя, а

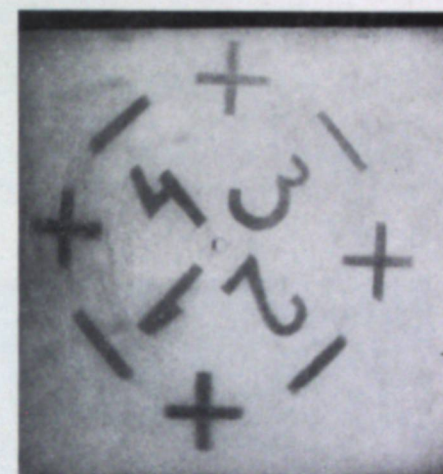
$$S_g = S_n + r,$$

где S_n — смещение точки окончательного изображения перпендикулярно оптической оси линзы венца за время экспонирования, r — кружок рассеяния, вызванный сдвигом той же точки вдоль оси, k — коэффициент учитывающий соотношение между полным и эффективным временем экспонирования, который в зависимости от формы зрачков камерного сорта пленки может меняться [1, 2] от 1 до 0.5.

В свою очередь, с достаточной степенью точности

$$S_n = S\Gamma \sin(\theta - \varphi).$$

Здесь Γ — увеличение линзы венца, S — смещение точки изображения по улитке Паскаля [3], φ — текущий угол поворота зеркала, θ —



4. Отпечаток с негатива, полученного в английской растровой камере серии 600 при нарушении (слева) и при хорошей (справа) сепарации изображений.

К ст. Л. В. Акимкина и др.,
стр. 38.



Рис. 2. Стереопара изображений пламени, снятого с частотой 4000 кадров/сек.

ду радиусом-вектором n улитки, по которой смещается промежуточное изображение, и касательной к ней определяется из соотношения

$$\theta = \arctg \left(n \frac{d\varphi}{dn} \right), \quad (4)$$

$$n = \frac{2p \cos(\varphi - \alpha)}{\cos \alpha} - 2R. \quad (5)$$

В (5) α — угол между оптической осью и прямой, соединяющей осевую точку промежуточного изображения A с осью вращения зеркала O ,
К ст. Л. Н. Пятницкого, стр. 63.

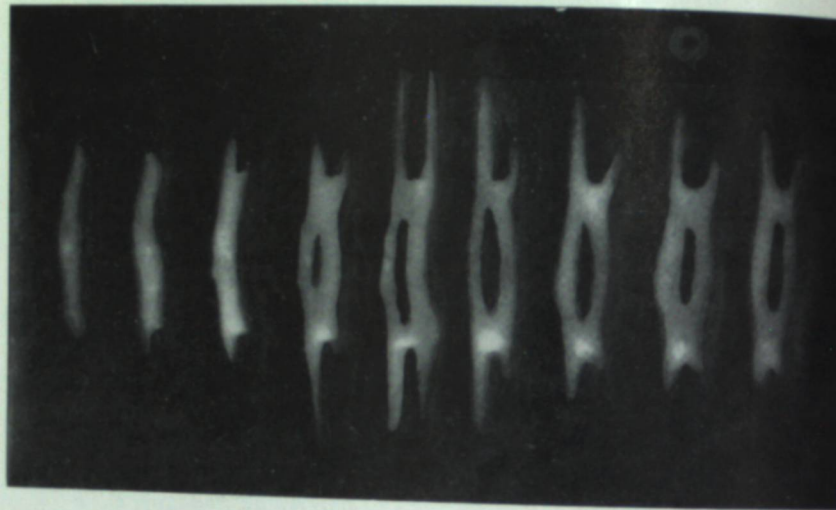


Рис. 3. Фотография кадровой развертки разряда конденсатора С-480 мкф через лампу ИФК-20.

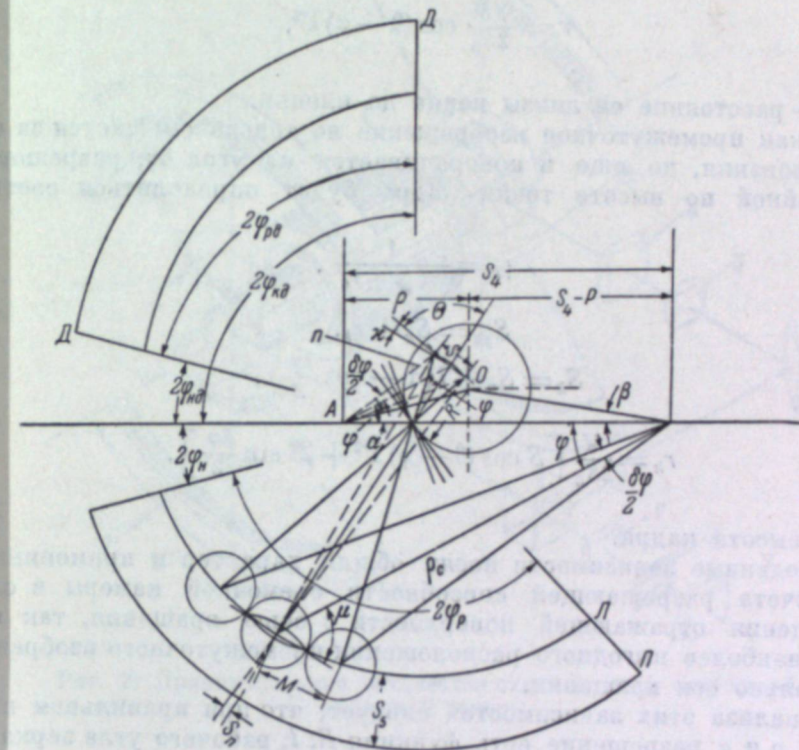


Рис. 1. Схема смещения изображения в течение экспонирования кадра.

A — осевая точка промежуточного изображения; O — ось вращения зеркала; L — линзовый венец; Π — киноплёнка.

— расстояние от оси вращения до отражающей поверхности, p — расстояние от проекции этой оси на оптическую ось до промежуточного изображения.

Величина S определяется соотношениями

$$S = 2 \sqrt{n^2 + n_\varphi^2 - 2nn_\varphi \cos \frac{\delta\varphi}{2}}, \quad (6)$$

$$n_\varphi = \frac{2p \cos \left(\varphi + \frac{\delta\varphi}{2} - \alpha \right)}{\cos \alpha} - 2R, \quad (7)$$

$$\delta\varphi = \arccos \frac{p_e - M \cos \mu}{\sqrt{p_e^2 + M^2 - 2p_e M \cos \mu}}, \quad (8)$$

$$p_e = \frac{2(S - p) \cos(\varphi + \beta)}{\cos \beta} + 2R, \quad (9)$$

где $\delta\varphi$ — угол поворота зеркала, в течение которого экспонируется кадр, M — высота линзочки венца, ρ_e — радиус-вектор улитки, по которой располагается линзовый венец, S_4 — расстояние от промежуточного изображения до линзового венца, β — угол между оптической осью прямой, соединяющей осевую точку изображения зрачка и ось вращения зеркала, μ — угол между радиусом-вектором ρ_e и касательной к улитке, определяемый из

$$\mu = \arctg\left(\rho_e \frac{d\varphi}{d\rho_e}\right).$$

Влияние дефокусировки выражается как

$$r = \frac{SM}{2S_5} \cos(\theta - \varphi) \Gamma^2,$$

где S_5 — расстояние от линзы венца до пленки.

Так как промежуточное изображение не только смещается за время экспонирования, но еще и поворачивается на угол $\delta\varphi$, разрешено для крайней по высоте точки кадра будет определяться соотношениями:

$$\begin{aligned} \rho_k &= \frac{1}{kS_{\rho k} + r_0}, \\ S_{\rho k} &= S_k + r_k, \\ S_k &= S_n + l\left(1 - \cos \frac{\delta\varphi}{2}\right), \\ r_k &= \frac{M}{2S_5} \left[S \cos(\theta - \varphi) \Gamma^2 + 2l \sin \frac{\delta\varphi}{2} \right], \end{aligned}$$

где l — высота кадра.

Приведенные зависимости носят общий характер и применимы для расчета разрешающей способности съемочной камеры в случае несовпадения отражающей поверхности с осью вращения, так и выбора наиболее выгодного расположения промежуточного изображения относительно оси вращения.

Из анализа этих зависимостей следует, что при правильном выборе величин ρ и α разрешение есть функция R , l , рабочего угла зеркала зрачка входа и углового поля зрения. Увеличение каждой из величин, особенно R и φ_p , понижает разрешение.

Рассматриваемые схемы камер легко делятся по конструкции вращающегося элемента на схемы с зеркальными многогранниками и схемы с плоскими зеркалами.

Ряд просчетов показал, что вследствие больших R разрешение у зеркальных многогранников при одних и тех же параметрах (размер кадра, зрачке входа, угловом поле и рабочем угле зеркала φ_p) гораздо ниже, чем у плоских зеркал.

Остановимся подробнее на плоских зеркалах, полагая, что значения не превышают $4\div 5$ мм.

В этом случае существенно упрощаются выражения для $\delta\varphi$ и S .

$$\delta\varphi = \frac{M}{S_4},$$

что вносит относительную ошибку в $\delta\varphi$, равную 2%, при $R/S = 1$, $R = 3.5$ мм и $22.5^\circ < \varphi < 67.5^\circ$, а

$$S = n\delta\varphi,$$

е. S_n выразится как

$$S_n = \frac{M\Gamma}{S_4} \left[\frac{2\rho \cos(\varphi - \alpha)}{\cos \alpha} - 2R \right] \times \sin \left\{ \arctg \left[\frac{R \cos \alpha}{\rho \sin(\varphi - \alpha)} - \operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) \right] - \varphi \right\}. \quad (18)$$

Расчетная проверка показала, что связанная с этими допущениями погрешность в разрешающей силе не превышает $4\div 5\%$ при $R \leq 4$ мм.

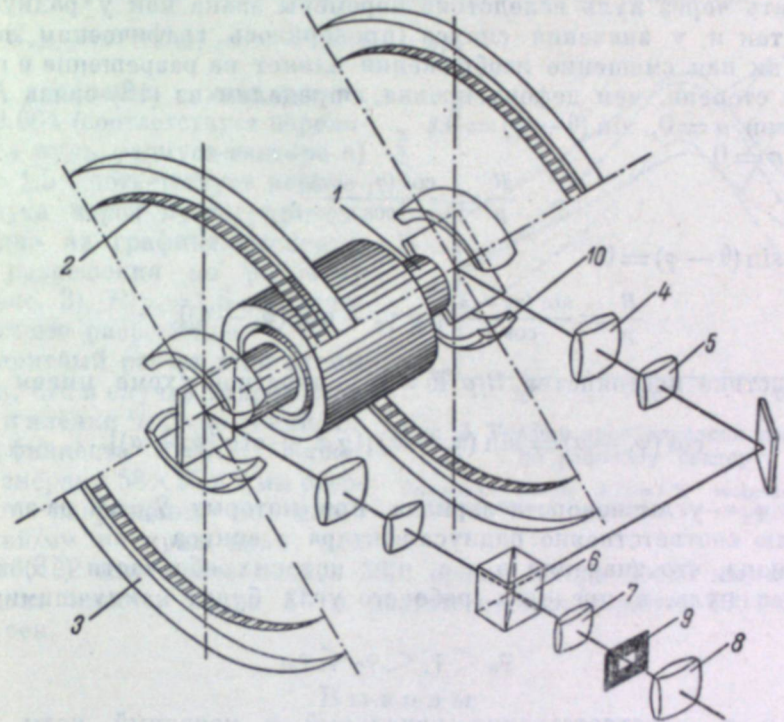


Рис. 2. Принципиальная оптическая схема ждущей скоростной съемочной камеры.

Необходимо отметить, что при расчете второго (дополнительного) бокового сектора Д—Д (рис. 1) угол α в (5), (7) и (18) будет положительным, а угол β в (9) — отрицательным.

Приведенные выкладки использованы автором для расчета оптической схемы ждущей кадрирующей камеры с зеркальной разверткой.

На принципиальной схеме (рис. 2) вал 1 с двумя тонкими зеркалами, имеющими двухстороннее зеркальное покрытие, рабочие сектора из линзовых венцов 2 и кинопленки 3, коллективы 4 и объективы 5 обеспечивают замкнутость при наличии всего двух зрачков входа, легко соединяемых при необходимости в один с помощью разделительного кубика 6. Объективы 7 и 8 и коллектив с полевой диафрагмой 9 служат для ограничения поля кадра.

Небольшой вес и осевая симметрия разворачивающегося элемента облегчают балансировку и допускают увеличение числа его оборотов. Использование высокочастотного электродвигателя обеспечивает малый износ вращающихся деталей, что упрощает его вакуумирование. Герметизация оптических ходов осуществляется с помощью стеклянных центрических сфер 10. Вакуумирование и вращение воздуха в малом объеме устраняют сильные возмущения и дают возможность использовать легкие зеркала.

Рассмотрим основные варианты такой схемы.

1. $\alpha \neq 0$, т. е. ось вращения не совпадает с оптической осью и ра-сектора находятся в неравных условиях (в наличии «основной» и «дополнительный» рабочие сектора).

2. $\alpha = 0$ — ось вращения на оптической оси, и сектора работают в равных условиях.

Очевидно, что наилучшее разрешение для конкретной схемы обеспечивается правильным выбором параметров p и α .

Из (3), (5), (17) и (18) следует, что S_n в процессе изменения φ_n переходит через нуль вследствие перемены знака как у радиуса-вектора n , так и у значения синуса (проверялось графическим построением). Так как смещение изображения влияет на разрешение в большей степени, чем дефокусировка, определим из (18) связь R/p из условий $n=0$, $\sin(\theta - \varphi) = 0$.

При $n=0$

$$\frac{R}{p} = \frac{\cos(\varphi_1 - \alpha)}{\cos \alpha}.$$

При $\sin(\theta - \varphi) = 0$

$$\frac{R}{p} = \frac{\sin(\varphi_2 - \alpha)}{\cos \alpha} [\operatorname{tg} \varphi_2 + \operatorname{ctg}(\varphi_2 - \alpha)].$$

Вследствие постоянства R/p и α в конкретной схеме имеем

$$\cos(\varphi_1 - \alpha) = \sin(\varphi_2 - \alpha) [\operatorname{tg} \varphi_2 + \operatorname{ctg}(\varphi_2 - \alpha)],$$

где φ_1 и φ_2 — углы поворота зеркала, при которых $S_n = 0$ из-за перехода нуля соответственно радиуса-вектора и синуса.

Очевидно, что значения p и α , при которых обе части (18) переходят через нуль, в пределах рабочего угла будут наилучшими; тогда

$$\varphi_n < \varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_k,$$

где φ_n и φ_k — соответственно начальный и конечный углы ра-зеркала. Так как при $\alpha=0$ из (21)

$$\cos \varphi_1 = \frac{1}{\cos \varphi_2},$$

или $\varphi_1 = \varphi_2 = 90^\circ$, т. е. в пределах φ_p невозможно расположить оба сектора с $\alpha \neq 0$ на первый взгляд представляется наиболее целесообразным расположить в пределах $\varphi_p = 60^\circ$ ($\varphi_n = 15^\circ$ и $\varphi_k = 75^\circ$).

При $\alpha = 37^\circ$, $R/p = 1.15$ оказывается возможным $\varphi_1 = 30^\circ$ и $\varphi_2 = 60^\circ$. В этом случае вблизи середины дополнительного сектора с $\varphi_{\text{ра}} = 15^\circ$ и $\varphi_{\text{кк}} = 45^\circ$ значение синуса переходит через нуль. Уменьшение основного и увеличение дополнительного секторов за счет угла α приводят к смещению нуля с середины дополнительного сектора, т. е. к существенному ухудшению разрешения.

Вследствие большого φ_p при $\alpha \neq 0$, определяющего размеры зеркала, рассматривалась также схема с $\alpha = 0$ и $\varphi_p = 45^\circ$ ($\varphi_n = 22.5^\circ$ и $\varphi_k = 67.5^\circ$).

Из сравнительного расчета при условиях $1/r_0 = 50$ линий/мм, размер кадра 16×22 мм, сумма кадров 200, размер зрачка входа 4×10 мм, разрешение в направлении высоты кадра 8° , коэффициент $k = 0.7$ получено, что наименьшее разрешение на краях секторов для случая $\alpha = 0$, $R = 1$ мм (размеры зеркала $58 \times 25 \times 3$ мм) равно наименьшему разрешению в кадре дополнительного сектора в случае $\alpha = 37^\circ$, $R = 1.6$ мм (размеры зеркала $80 \times 25 \times 3.2$ мм).

Так как в случае $\alpha \neq 0$ не имеется преимуществ в разрешении, а световые пучки занимают угол порядка 160° , что усложняет конструкцию коллектива и вакуумирующих сфер и затрудняет вакуумирование, схема с $\alpha = 0$ оказывается более выгодной.

Плотность этой схемы обеспечивается углом скрещивания зеркал $\varphi_n = 22.5^\circ$ и $\varphi_p = 45^\circ$.

Здесь p определяется из равенства разрешения на краях рабочего сектора при условии улучшения в центре, т. е. из уравнения

$$S_{n22.5^\circ} = -S_{n67.5^\circ}. \quad (24)$$

Это уравнение имеет корни $R/p = 0.664$ (соответствует переходу нуля радиуса-вектора n) и $R/p = 1.5$ (соответствует переходу синуса через нуль), причем, видно из графика распределения разрешения по рабочему сектору (рис. 3), $R/p = 1.5$ обеспечивает лучшее разрешение.

Габаритный расчет этой схемы показал, что в случае разрешения 40 и пленки $1/r_0 = 40$ линий/мм коэффициенте $k = 0.7$, зеркала размерами $58 \times 25 \times 2$ мм обеспечивают разрешение не менее 16 линий/мм на краю поля, при 16×22 мм, сумме кадров 200, зрачке входа 4×10 мм, поле зрения вдоль высоты кадра 8° и частоте съемки порядка 500–600 тыс. кадров/сек.

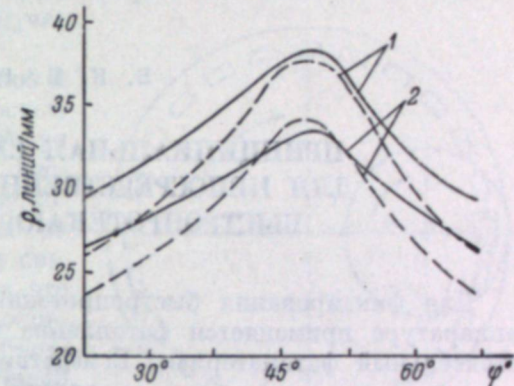


Рис. 3. График распределения разрешения по рабочему сектору.

Сплошная линия $R/p = 1.5$; штриховая — для $R/p = 0.664$. 1 — на оси; 2 — на краю поля.

Выводы

Получены уравнения, связывающие габаритные размеры элементов оптической схемы скоростной съемочной камеры с зеркальной разверткой, обеспечивающей разрешение в случае несовпадения отражающей поверхности зеркала с осью вращения. Приведены способы выбора наилучшего разрешения промежуточного изображения. Предложена новая схема камер с предпологаемой частотой съемки в 500–600 тыс. кадров/сек. на 35-мм кадр.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Васильев, С. С. Семенов, Е. А. Тарантов, Изв. АН СССР, сер. техн., 11, 186, 1957.
2. А. Васильев, Е. А. Тарантов, УНФ, VI, 113, 1959.
3. С. Дубовик, УНФ, VI, 102, 1959.
4. Е. А. Тарантов, Авт. свид. № 139191.

В. К. БАРАНОВ

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА УСТРОЙСТВА ДЛЯ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО НАБЛЮДЕНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

Для фиксации быстропротекающих процессов в существующих, то можно считать, что на это аппаратуре применяется фотопленка или какой-либо другой светочувствительный фотоматериал. Вследствие этого между исследуемым объектом и моментом наблюдения этого процесса проходит определенный, иногда довольно продолжительный промежуток времени, необходимый для обработки фотоматериала. В то же время если в фотослоях использовать люминофор, можно представить себе принципиальную схему прибора, в котором для фиксации изображений отдельных фаз движения объекта используется свойство люминофора светиться после прекращения их облучения. При этом начальный момент наблюдения этого процесса в приборе совпадает с началом наблюдаемого процесса.

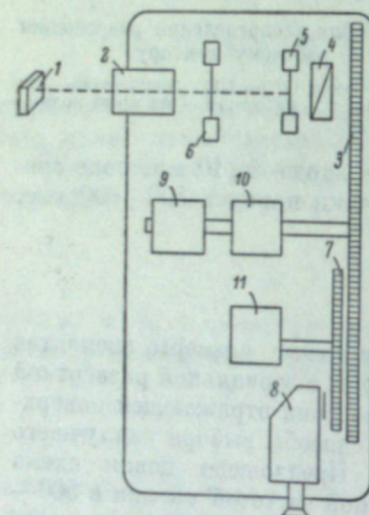


Рис. 1. Принципиальная схема прибора для непосредственного наблюдения быстропротекающих процессов.

В отличие от стробоскопических приборов, позволяющих рассматривать только периодические процессы, прибор, с помощью которого рассматривается, дает возможность наблюдать замедленно одиночные и непериодические процессы.

Движущийся объект, подлежащий наблюдению, изображается объективом на пластинке, покрытой люминофором (каким-либо кристаллофосфором). Через специальное устройство наблюдения рассматривает одну за другой пластинки со светящимися на них изображениями отдельных фаз движения объекта. Последовательное рассматривание фаз движения создает у наблюдателя впечатление непрерывного движения.

Принципиальную схему прибора можно представить себе следующим образом.¹ Объект проекции 1 (рис. 1) изображается объективом 2 в виде изображения на поверхности диска 3. Устройство для оптического выравнивания компенсирует сдвиг поверхности диска относительно изображения. На поверхности диска укреплены пластинки, на которые нанесен люминофор.

гор 9 через редуктор 10 вращает диск 3 с определенной скоростью. Вор 6 открывается в интересующий нас момент на отрезок времени, течение которого диск 3 делает один полный оборот, а затвор 5 открывается только на время прохождения очередной пластинки мимо устройства 4.

Кристаллофосфоры обладают свойством светиться после прекращения облучения. Пластинки с кристаллофосфором, на которые в течение короткого времени объектив проектировал изображения, становятся на некоторое время носителями светящегося изображения. Длительность течения изображения $T_{св}$ определяется природой выбранного кристаллофосфора и интенсивностью его облучения.

Пусть диск 3 имеет M пластинок и вращается со скоростью n_d об./сек. За время открытия затвора т. е. за время полного оборота диска, все M пластинок будут «проэкспонированы». Так как изображения на пластинках будут в течение $T_{св}$ светиться.

Отрезок времени, фиксируемый прибором, обозначим $T_{раб}$. Очевидно,

$$T_{раб} = \frac{1}{n_d} \text{ сек.}$$

Сразу же отметим, что использование для освещения объектов импульсного источника света, синхронизированного с работой камеры, позволит значительно упростить описанную часть прибора за счет исключения из схемы затворов 5, 6 и устройства 4.

Другая часть прибора, которую можно назвать визуальной, позволяет наблюдателю поочередно рассматривать светящиеся кадры. Эта часть состоит из obturator 7 и окулярного устройства 8. Obturator 7 (рис. 2) представляет собой непрозрачный диск с отверстием. Скорости вращения obturator 7 и диска 3 различны, но соотношение этих скоростей строго определено и устанавливается редуктором 11 (рис. 1). Расположение отверстия obturator таково, что оно может быть совмещено с какой-либо пластинкой диска 3 только в области изображения объекта, создаваемого оптической системой прибора. Окулярное устройство 8 включает в себя систему оптического выравнивания и окуляр и позволяет наблюдателю рассматривать светящееся изображение объекта в момент прохождения его мимо устройства 8.

Редуктор 11 связывает диск 3 и obturator 7 таким образом, что скорости вращения диска n_d и obturator n_o определяются следующим соотношением:

$$n_d = n_o \left(1 + \frac{1}{M} \right), \quad (1)$$

где M — число пластинок диска. Допустим, что в какой-то момент времени пластинка совмещена с отверстием obturator и рассматривается наблюдателем. После одного оборота obturator, как это видно из (1), диск сделает $1 + 1/M$ оборотов, в тот момент, когда отверстие obturator снова окажется перед окулярным устройством 8, с отверстием уже будет совмещена пластинка

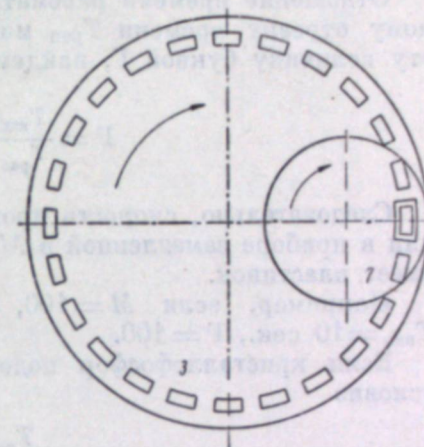


Рис. 2. Визуальная часть прибора.

m_2 . Чтобы глаз просмотрел все пластинки, обтюратор, очевидно, должен сделать $N-1 \approx M$ оборотов.

Итак, приемная часть прибора фиксирует на время $T_{\text{св}}$ протекающий в течение $T_{\text{раб}} = 1/n_d$ сек. Наблюдатель может рассматривать эти изображения в промежуток времени $T_{\text{вид}}$, в течение которого обтюратор сделает M оборотов, т. е.

$$T_{\text{вид}} = \frac{M}{n_d} \text{ сек.}$$

Отношение времени рассматривания пластинок $T_{\text{вид}}$ к зафиксированному отрезку времени $T_{\text{раб}}$ можно назвать «замедлением». Обозначим эту величину буквой Γ , найдем, что

$$\Gamma = \frac{T_{\text{вид}}}{T_{\text{раб}}} = \frac{M}{n_d} : \frac{1}{n_d} = M.$$

Следовательно, скорость протекания процесса кажется при наблюдении в приборе замедленной в M раз, т. е. во столько раз, сколько имеет пластинок.

Например, если $M=100$, $n_d=10$ об./сек., то $T_{\text{раб}}=0.1$ сек., $T_{\text{вид}}=10$ сек., $\Gamma=100$.

Если кристаллофосфор подобран таким образом, что выполнено условие

$$T_{\text{св}} \geq b \cdot T_{\text{вид}},$$

где b — какое-либо положительное число, то в этом случае границы использования прибора расширяются. Действительно, если соотношение скоростей диска и обтюратора таково, что выполняется условие то в этом случае можно b раз подряд просмотреть один и тот же промежуток процесса. Если же выполняется условие

$$n_d = b \cdot n_{\text{об}} \left(1 + \frac{1}{M}\right),$$

т. е. отверстие обтюратора совмещается с последующим кадром только после его b оборотов, то время рассматривания процесса и, следовательно, видимое замедление процесса возрастает в b раз, т. е.

$$T_{\text{вид}} = b \cdot \frac{M}{n_d} \text{ и } \Gamma = b \cdot M.$$

Используя температурное тушение свечения кристаллофосфора, можно рассматривать отдельные моменты процесса, отделенные друг от друга незначительными промежутками времени.

Энергетический расчет показывает, что при существующих люминофорах и источниках света можно создать прибор, позволяющий, по ориентировочной оценке, получать замедления до 100 и более раз при рассматривании несамосветящихся объектов. Рассматривание ярких самосветящихся объектов повышает возможности прибора.

Яркость свечения кристаллофосфоров довольно быстро спадает. Поэтому этому может оказаться, что яркость изображения в начале и конце рассматривания следует выравнивать серым клином. Для повышения яркости свечения некоторых люминофоров целесообразно использовать свойство ярко вспыхивать в начале процесса тушения. Такую оптическую вспышку очередной пластинки можно произвести в момент прохождения

пластинки мимо окуляра. Вместо лупы наблюдателя или одновременно с ней может быть установлена кинокамера обычного, нескоростного

принципе вместо люминесцентного способа в приборе может быть использован способ электрофотографии — при условии получения достаточно чувствительного слоя.

Описанная принципиальная схема прибора основана лишь на теоретических предположениях и расчетах. Поэтому какие-либо характеристики, которые можно ожидать от прибора подобного типа, могут быть сделаны только в результате изготовления макета прибора и его испытания.

Л. Н. ПЯТНИЦКИЙ

ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КАДРОВОЙ СЪЕМКИ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПИМ-4, УПРАВЛЯЕМОГО ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМОЙ

Широкие возможности для развития техники скоростного фотирования открывает использование электронно-оптических преобразователей, которые дают возможность сократить выдержки до 10^{-8} и меньше.

Схема, необходимая для управления работой преобразователя может быть построена как на тиратронных приборах, так и на электронных.

Схемы, построенные на тиратронах, благодаря применению позволяют получать управляющие импульсы хорошей формы с малыми временами нарастания. Однако подобные схемы неудобны с точки зрения возможности изменения частоты, выдержки и числа экспонированных кадров. Кроме того, для выдержек порядка 10^{-7} – 10^{-6} сек. и больше такие схемы сложны по сравнению с электронными.

Преобразователь управляется специальной схемой на электронных лампах, обеспечивающей получение многокадровой развертки изображения объекта на экране преобразователя и формирование импульсов экспозиции.

Прибор обеспечивает съемку с частотой 10 000, 50 000, 100 000 кадров/сек. с выдержками 0.5, 1.0 и 2.0 мксек. Он позволяет получать от 4 до 30 кадров в зависимости от их размеров. Кадры располагаются на экране в один ряд. Прибор имеет два режима работы: непрерывный и ждущий; в последнем случае прибор запускается от электрического импульса, подаваемого извне.

Прибор дает возможность осуществлять съемку одноразовых процессов протекающих процессов без задержки и с задержкой от 3 до 300 мксек, а также вести визуальное наблюдение различных фаз повторяющихся процессов.

Чувствительность фотокатода составляет $40 \div 70$ мка/лм. Световой экран для панхроматической пленки достигает около 10 лм/вт.

Разрешающая способность прибора в режиме кадровой развертки в пересчете на фотокатод — $25 \div 30$ линий/мм.

Как следует из блок-схемы (рис. 1), прибор содержит электронный преобразователь I, источник питания преобразователя II, ускоряющее и подфокусирующее напряжения, запускающее устройство III, программное устройство IV, устройство формирования ступенчатого развертывающего напряжения V и устройство формирования затворных импульсов VI.

Импульсный многокадровый электронно-оптический преобразователь ПИМ-4 подробно описан в [1].

Конструкция трубки позволяет управлять положением изображения на экране, а также разрешать и прекращать перенос изображения. Эти функции выполняют вертикальные и горизонтальные отклоняющие пластины, имеющие чувствительность около 28 в/мм, и пластины коммутационного затвора с чувствительностью 32 в/мм. На один из электродов трубки подается дополнительный подфокусирующий потенциал.

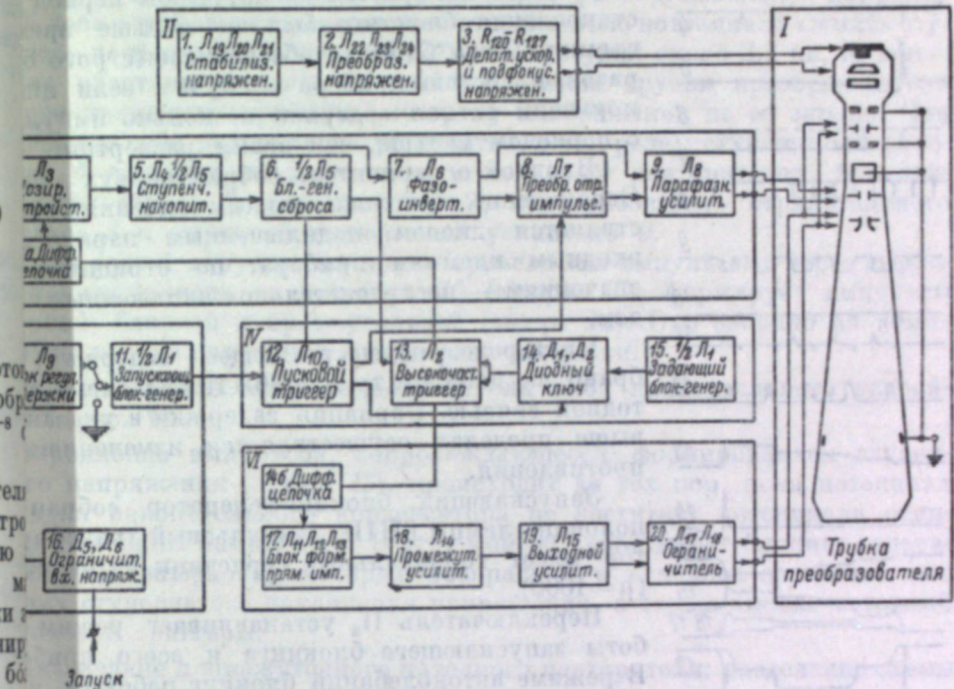


Рис. 1. Блок-схема прибора.

Источник питания трубки преобразователя II состоит из стабилизатора напряжения последовательного типа с управлением со стороны выходного напряжения — 1, преобразователя напряжения — 2, делителя напряжения — 3. Он обеспечивает постоянное выходного напряжения с точностью не ниже 0.1%. Устройство подробно описано в литературе [2]. Схема электронного источника была разработана в Лаборатории высоковольтного разряда Энергетического института им. Г. М. Кржижановского. Запускающее устройство III обеспечивает два режима работы прибора: непрерывный и ждущий.

В первом режиме прибор приводится в действие импульсами, формируемыми блокинг-генератором IV при его работе в режиме автоколебаний. Во втором режиме запуск осуществляется от внешнего импульса; задержка между моментом поступления импульса и моментом срабатывания блокинга регулируется в пределах $3 \div 300$ мксек. В качестве устройства, дающего инициирующий импульс, может быть использован датчик давления, фотоэлемент, нагрузочное сопротивление.

Запускающее устройство состоит из ограничителя входного напряжения, блока регулируемой задержки 10 и запускающего блокинг-генератора 11. Ограничитель выделяет из входного сигнала импульсы фиксированной амплитуды (эпюры 1, 2 на рис. 2). Блок регулируемой задержки,

выполненный на кини-реле, обеспечивая задержку запуска. Запускающий триггер 12 переводится в рабочее положение (эпюры создает возможность фотографирования различных стадий исследования положительным импульсом запускающего блокинг-генератора 11 процесса (эпюры 3, 4 на рис. 2). На выходе блока задержки образуется диод, срезающий отрицательную компоненту импульса.

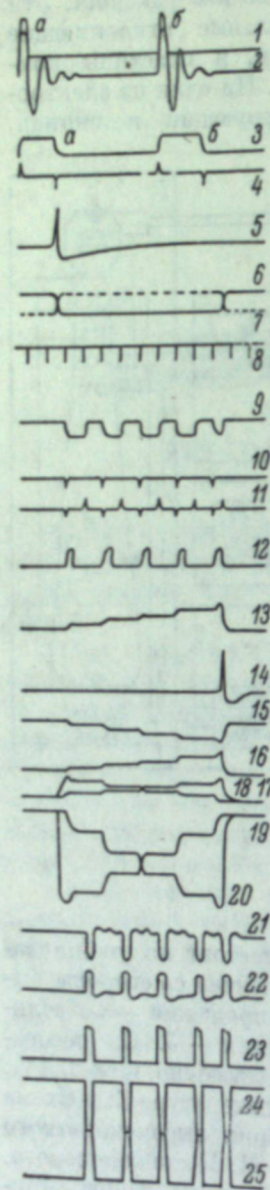


Рис. 2. Эпюры напряжений в основных узлах прибора.

500 000 сек.⁻¹.

Амплитуда этих импульсов равна приблизительно 25 в. Высокочастотный триггер 13, собранный на лампе 6Н15П, предназначен для получения импульсов, которые используются при формировании основных напряжений, управляющих трубкой преобразователя.

Триггер подключен к блокингу через диодный ключ по схеме, показанной на рис. 2. Пропускание или задержание импульсов диодным ключом (эпюры 8, 9 на рис. 2) определяется состоянием пускового триггера.

Задержанный отрицательный импульс запускает блокинг-генератор, вырабатывающий одиночный сигнал постоянного напряжения (эпюра 5). Собственная частота блокинг-генератора выбирается такой, чтобы период становления блокинга был не меньше 1 мкс. Тогда блокинг обеспечивает стробирование прибора в случае, если на пластины горизонтального отклонения трубки преобразователя иррадирующий сигнал содержит несколько импульсов.

Входной ограничитель собран на двух лампах 5 емкостно-диодного типа с катодным повторителем, блокинг-генератор сброса 6, фазоинвертер 7, преобразователь отрицательного сигнала 8 и выходной парафазный усилитель 9. Ограничение по положительным значениям осуществляется диодом, подключенным параллельно 8 и выходной парафазный усилитель 9.

Входным клеммам прибора, по отрицательным значениям — последовательно включенная цепочка от триггера 13 (эпюра 10), формирует импульсы, близкой к прямоугольной (эпюра 12). Оно собрано на лампе 6Н1П по той же схеме, что и кини-реле задержки.

Кини-реле, осуществляющее задержку, собрано на двойном триоде (6Н1П) по схеме, показанной на рис. 1. Вариация задержки в указателе 5 (рис. 1) осуществляется изменением сопротивления.

Накопление импульсов, сопровождающееся формированием ступенчатого напряжения (эпюра 13), происходит до тех пор, пока потенциал анода накопительного конденсатора не достигнет потенциала отпирания лампы 6Х6. В этот момент срабатывает блокинг-генератор сброса (эпюра 14), который возвращает в исходное состояние всю цепочку накопления напряжения, а также высокочастотный триггер.

Переключатель P_2 устанавливает режим работы запускающего блокинга и всего прибора. В режиме автоколебаний блокинг работает независимо от входного сигнала. В режиме ожидания запускается по аноду от отрицательного импульса с дифференцирующей цепочкой блокинг-генератора. Амплитуда выходного импульса (эпюра 5 на рис. 2) блокинг-генератора достигает 25 в.

Программное устройство IV управляет работой элементов формирующих ступенчатое и отрицательное ступенчатые напряжения (эпюры 15, 16 на рис. 2) с амплитудой порядка 25 в, которые подаются на сетки запертой лампы (ГУ-29) с анодным напряжением 1500 в. Частотный блокинг-генератор 15, высокочастотной усилительной лампы (ГУ-29) с анодным напряжением 1500 в. На сетку половины лампы поступает ступенчатое напряжение, нарастающее в отрицательном направлении. Для полноценного использования лампы необходимо, чтобы в исходном состоянии лампа была полностью открыта. Поскольку подобный форсированный режим недопустим, в схему введено устройство преобразования отрицательного импульса, открывающее эту половину лампы непосредственно перед началом формирования ступенчатого напряжения. Управление этим устройством осуществляется анодным напряжением (эпюра 7) пускового триггера.

Блокинг 15 работает в режиме автоколебаний. Частота колебаний блокинга (эпюра 8 на рис. 2) при выбранных параметрах может быть в пределах от 20 до 50 кГц. Частота этих импульсов равна приблизительно 25 в. Высокочастотный триггер 13, собранный на лампе 6Н15П, предназначен для получения импульсов, которые используются при формировании основных напряжений, управляющих трубкой преобразователя.

Триггер подключен к блокингу через диодный ключ по схеме, показанной на рис. 2. Пропускание или задержание импульсов диодным ключом (эпюры 8, 9 на рис. 2) определяется состоянием пускового триггера. Трубкой преобразователя изображением на ее экране. Оно с периодом меньше, чем время развертки, включает в себя дозирующее устройство (кини-реле), ступенчатый накопитель напряжения (эпюра 13), происходит до тех пор, пока потенциал анода накопительного конденсатора не достигнет потенциала отпирания лампы 6Х6. В этот момент срабатывает блокинг-генератор сброса (эпюра 14), который возвращает в исходное состояние всю цепочку накопления напряжения, а также высокочастотный триггер.

Устройство формирования затворных импульсов VI генерирует симметричные относительно потенциала «земли» прямоугольные импульсы амплитудой около 2 кв, подаваемых на затворные и компенсационные пластины трубки преобразователя и осуществляющие кратковременное открывание затвора. Экспонирование происходит за время существования импульсов благодаря сбросу потенциалов затворных и компенсационных пластин до потенциала «земли» (эпюры 24, 25 на рис. 2).

В устройство VI входят блок формирования прямоугольных импульсов 17, усилители 18, 19 и ограничитель 20.

Блок формирования прямоугольных импульсов представляет схему с контуром ударного возбуждения и состоит из запертого диода (6Ж5П), контура ударного возбуждения, диода (6Ц40П) и отпирателя (6Э5П). Схемы запускаются положительными пиками напряжения, полученными в результате дифференцирования импульсов от частотного триггера 13 (эпюра 11), которые сдвинуты относительно падов ступенчатого напряжения на величину периода колебаний кинка 15, т. е. на полпериода повторения кадров.

При действии положительного импульса на сетку пентода он возбуждается, и ток разряда конденсатора возбуждает собственные колебания в контуре. В первый полупериод, пока напряжение на контуре отрицательно, демпферный диод, подключенный параллельно контуру, не влияет на характер колебаний. Во второй полупериод контур возбуждается диодом и колебания становятся аperiodическими. Формирование на контуре показана эпюрой 21. Длительность прямоугольных импульсов в основном определяется параметрами контура. Импульсы в схеме переключаемые контуры могут давать прямоугольные импульсы длительностью 0.5, 1.0 и 2.0 мксек.

С анода усилителя-ограничителя 20 (эпюра 22) импульсы поступают на промежуточный усилитель 18 (6П13С) и усилитель 19 (ГУ29).

Импульсы проходят через диодный ограничитель 20, который дает им форму, изображенную эпюрами 24 и 25. Одновременно в выходном контуре осуществляется смещение опорных уровней импульсов. Сформированные в таком виде парафазные импульсы подаются на затворные и компенсационные пластины трубки.

Как уже было указано, запуск прибора осуществляется импульсами напряжения от любого внешнего датчика. Момент начала формирования импульсов может быть задержан относительно момента появления импульса на регулируемый промежуток времени. Такой запуск принципиально отличается от методов синхронизации, применяемых в различных оптико-механических устройствах, и имеет значение при исследовании процессов, характеристики которых разброс во времени.

Существенной особенностью схемы является то обстоятельство, что моменты возникновения затворных импульсов строго соответствуют средним точкам ступенек импульса кадровой развертки. Этим обеспечивается открывание затвора каждый раз в момент, когда напряжение развертки становится наиболее близким к постоянному. Отсюда следует, что выдержка не может превышать половины периода следования кадров.

Рабочие характеристики и параметры прибора могут быть существенно улучшены без принципиальных изменений его схемы. Основными направлениями усовершенствования прибора следует считать 1) повышение быстродействия высокочастотного триггера и кип-реле; 2) увеличение амплитуды импульсов от кип-реле; 3) улучшение качества импульсных трансформаторов. Последняя мера имеет особое значение, так как нежелательное искажение формы затворных импульсов происходило исключительно по вине трансформаторов, изготовленных кустарным способом на

из стальной (ХВП) ленты, толщина которой оказалась больше расчетной. При выполнении этих мер частота съемки может быть увеличена примерно до 1 мГц.

Возможности применения прибора будут значительно расширены, если его снабдить линейной разверткой и ступенчатой многоэлектрической разверткой. Для получения многоэлектрической развертки достаточно подавать на пластины вертикального отклонения ПИМа ступенчатое напряжение, полностью повторяющее схему описанного выше устройства V.

Оптическая часть прибора состоит из сменного объектива, проецирующего изображение объекта на фотокатод преобразователя, и фотоприемника, с помощью которой фотографируется вторичное изображение на экране. В зависимости от условий съемки могут быть использованы объективы с различными фокусными расстояниями. Для фотографирования на может быть использована фотопроставка от осциллографа с трубкой диаметром 150 мм.

Вся электронная часть прибора размещена в дюралевом корпусе размерами (без объектива и фотопроставки) 360×440×620 мм. На передней панели установлена рукоятка регулировки подфокусирующего напряжения и гнезда для подключений кабелей питания электрической схемы прибора. На заднюю панель прибора, обращенную к оператору, вынесены рукоятки фокусировки объектива, установки времени экспозиции, частоты съемки, выдержки, числа кадров, амплитуды развертки импульсов. Там же установлены тумблер выбора режима работы (ждущего или непрерывного) и гнезда для подачи стартового импульса.

Для демонстрации работы прибора фотографировались разряды в импульсной лампе ИФК-20 (рис. 3; см. вклейку, стр. 49).

Длительность вспышки этой лампы в номинальном режиме при емкости 2500 мкф составляет 200 мксек. На фотографии представлена кадровая развертка разряда через импульсную лампу ИФК-20 емкостью 480 мкф при напряжении 150 в, полученная при частоте 200 тыс. кадров/сек. при выдержке 0.5 мксек. Время возрастает на направо. На фотографии темные полосы — это изображение электродов лампы.

Светящаяся точка в середине разрядного промежутка получалась от ионизирующей искры, создаваемой третьим электродом.

Как видно из фотографии, наибольшей яркости свечения разрядный промежуток достигает на втором и третьем видимых кадрах, затем яркость в центре канала начинает убывать. В дальнейшем возрастает яркость свечения у катода, достигая максимума на шестом кадре.

При съемке использовался телеобъектив Юпитер-11 при относительном отверстии 1 : 22.

В заключение автор приносит глубокую благодарность чл.-корр. СССР Л. Н. Хитрину за предоставление возможности ведения работ в ЦИО. техн. наук М. М. Бутслову за ценные советы и указания. В создании прибора принимали участие ст. инженер М. Г. Рейнберг и радиотехник В. М. Пантелеев.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Бутслов, УНФ, VI, 76, 1959.
2. М. Бонч-Бруевич. Применение электронных ламп в экспериментальной физике. ГИИТЛ, 1957.
3. В. Гусев. Формирование импульсов. Воениздат, 1958.

М. И. ПЕРГАМЕНТ, Ю. Е. НЕСТЕРИХИН,
В. С. КОМЕЛЬКОВ

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ КАДРОВЫЕ СЪЕМОЧНЫЕ КАМЕРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

В настоящей работе рассматриваются некоторые результаты работы схем управления и вопросы улучшения электронно-оптических преобразователей, применяемых для сверхскоростной регистрации

Съемка электронно-оптическими преобразователями,
снабженными электронными затворами

Многокадровая съемка с помощью электронно-оптических преобразователей, снабженных электронным затвором, осуществляется путем координатного перемещения электронного изображения в горизонтальном и вертикальном направлениях. Экспонирование происходит в моменты остановки изображения. В соответствии с этим на горизонтальные и вертикальные пластины преобразователя подаются многоступенчатые отклоняющие импульсы, а на пластины затвора прямоугольные импульсы. Число кадров в ряду и количество отклоняющих импульсов определяются числом «ступенек» отклоняющих импульсов, а длительность — их длительностью.

Трудность формирования отклоняющих импульсов заключается в требованиях к их стабильности и симметрии. Для получения влетворительной разрешающей способности изображения необходимо выдерживать стабильность «стола» киловольтных импульсов в пределах $0.1 \div 0.5\%$ их амплитуды и несимметрию разнополярных напряжений отклоняющих пластин в пределах $0.2 \div 0.5\%$ от напряжения на электронно-оптическом преобразователе. Последнее требование при необходимости использования для отклонения напряжений полярностей. При обычной системе развертки это вносит серьезные ограничения как по величине, так и по скорости отклонения изображений, связанных с формированием высоковольтных положительных импульсов.

Предложенный нами способ развертки обходит эти трудности и позволяет использовать для отклонения только импульсы отрицательной полярности. При этом каждый из двух отрицательных ступенчатых импульсов, один с возрастающими, другой со спадающими уровнями «ступенек», подается на разные отклоняющие пластины одной пары. Совместно с равномерно поданным на обе пластины равным постоянным положительным смещающим потенциалом эти импульсы образуют ряд напряжений

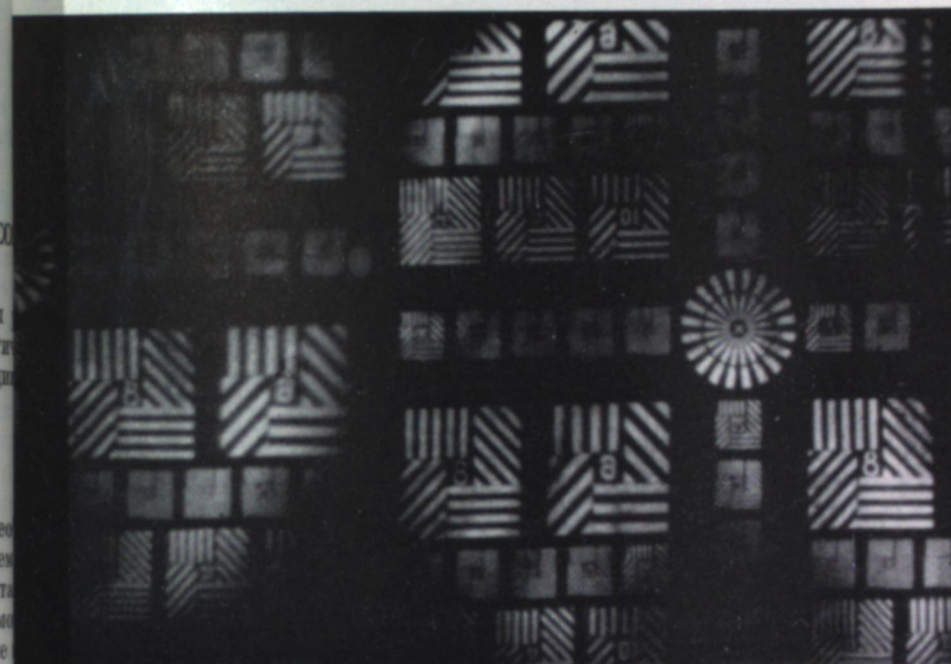


рис. 4. Кадровая съемка миры, подсвеченной импульсной лампой, на преобразователе типа ПИМ-3.

Частота съемки $2.5 \cdot 10^6$ кадров/сек., выдержка 10^{-7} сек.

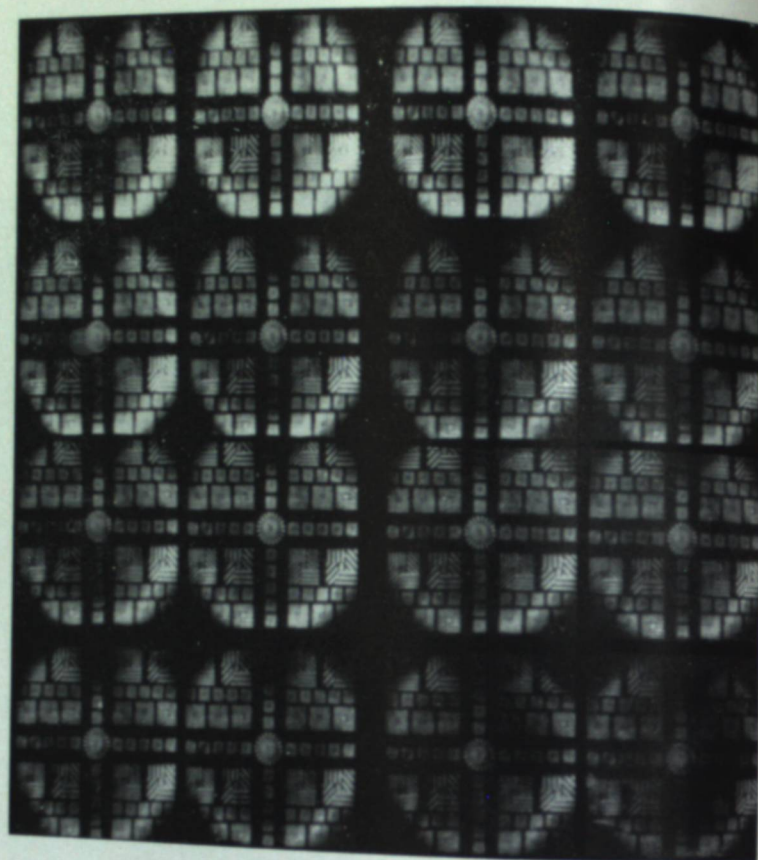


Рис. 5. Кадровая съемка мира, подсвеченной импульсной лампой, на преобразователе типа ПИМ-3.
Частота съемки 10^6 кадров/сек., выдержка $5 \cdot 10^{-7}$ сек.



Рис. 8. Осциллограмма светового импульса СФР.
Частота съемки 10^6 кадров/сек., метки времени через 0.2 миксек.

заковых по величине и разных по знаку. Симметрирование легко осуществляется путем регулирования этого смещающего потенциала.

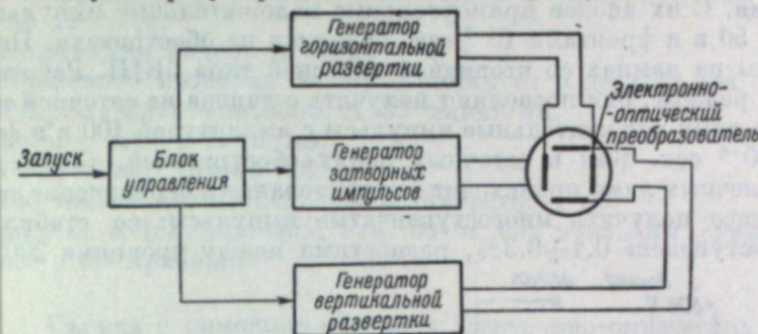


Рис. 1. Блок-схема устройства для съемки управляемыми электронно-оптическими преобразователями.

В выполненном варианте прибора как для горизонтального, так и для вертикального отклонения применены четырехступенчатые импульсы, вертикальные изображающие в четыре ряда, по четыре кадра в ряду. В соответствии с этим генераторы горизонтального и вертикального отклонения совершенно одинаковы, но запускаются так, длительность «ступенек» в первом ровно в четыре раза больше, чем второго.

Блок-схема всего устройства приведена на рис. 1. Пускаемый от исследуемого объекта блок управления дает серии импульсов, определяющих частоту съемки, величины выдержки каждого кадра, временные интервалы между сериями и т. д. По сигналам блока управления происходит формирование отключающих и затворных импульсов.

Формирование ступенчатых импульсов происходит по схеме с общей анодной нагрузкой наподобие применяемой в развертке потенциоскопов [1, 2]. Скелетная схема выходных каскадов и формы токов и напряжений приведены на рис. 2. Системные обратные связи компенсируют недостаточность внутреннего сопротивления выходных ламп, так что их значения одинаковы — $i_{a1} = i_{a2} = i_{a3} = i_{a4}$. При равенстве сопротивлений $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ этим обеспечивается одинаковая разность уровней соседних «ступенек».

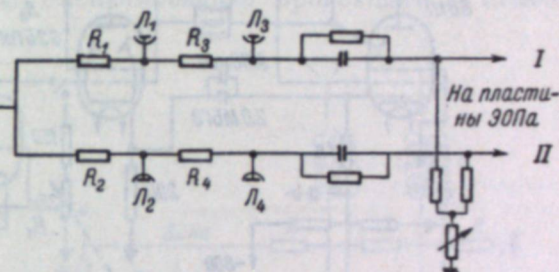


Рис. 2. Скелетная схема выходных каскадов и эюры выходных напряжений и токов.

3. Вариация выдержки от 1-го до 16-го кадра в 20 раз.
4. Задержка начала съемки после прихода запускаящего импульса 10^{-7} до 10^{-4} сек.
5. Количество кадров в серии 4 и 8.
6. Временной интервал между сериями от 0 до 10^{-4} сек.
7. Разрешающая способность 30 линий/мм.
8. Размер кадра 5×5 мм.
9. Количество кадров 16.
10. Эквивалентное относительное отверстие 1 : 3.

На рис. 4, 5 (см. вклейку, стр. 64 и 65) показаны снимки миры, ланные этим прибором.

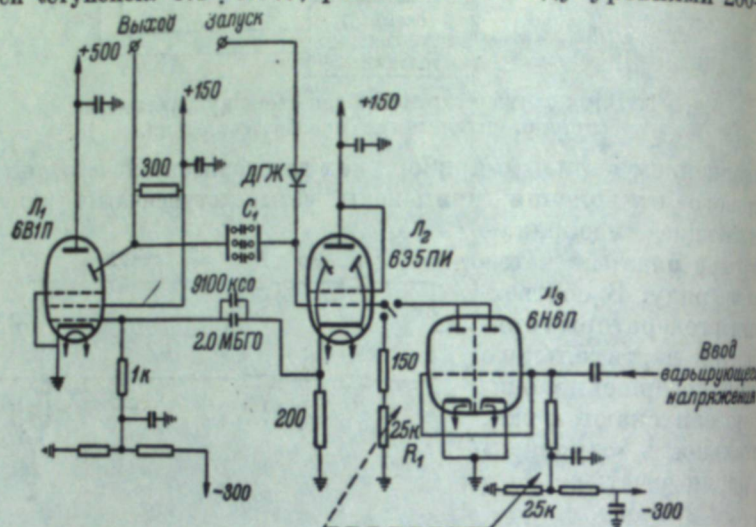


Рис. 3. Схема предварительного формирования затворных импульсов

фронтами $(3 \div 5) \cdot 10^{-8}$ сек. и длительностью «ступенек» от 2 до $2 \cdot 10^{-4}$ сек.

Предварительное формирование затворных импульсов при помощи переменного сопротивления диода в схеме, представленной на рис. 3. Схема запускается положительным импульсом с электронного блока управления. Длительность сформированных импульсов по отношению к длительности сигнала блока управления. Длительность сформированных импульсов по отношению к длительности сигнала блока управления 1 : 1, удовлетворяющих требованиям, снимаемых с анода, определяется емкостью конденсатора C_1 и сопротивлением утечки катодного анодного режима, позволяет получить импульсы, как видно из схемы, может быть заменено резистором R_1 . Последнее, как видно из схемы, может быть заменено резистором L_3 , путем воздействия на сетку которого осуществляется изменение размера кадров размером $\times 20$ мм с разрешением до держки отдельных кадров в процессе съемки. Так же как и в генераторе кадров. Такие преобразования, после обострителя дважды демпфированные импульсы позволяют создавать изображения на сетке выходной лампы. Сформированные отпирающие импульсы небольшой амплитудой 2,5 кв с фронтами $(2-3) \cdot 10^{-8}$ сек., стабильностью высокой временной и оптической импульсов $\approx 0,1\%$ и длительностями от $5 \cdot 10^{-8}$ до $5 \cdot 10^{-6}$ сек. подкой разрешающей способностью на компенсационный затвор электроно-оптического преобразователя.

Блок управления

Блок управления, обеспечивающий съемку в режимах, определенных техническими параметрами прибора, представляет собой девятиканальный генератор запускающих импульсов.

При замене генератора горизонтальной развертки генератором с постоянно изменяющегося напряжения прибор может работать в режиме фоторегистратора и дает на экране преобразователя четыре фотополоски с регулируемыми временными интервалами между ними. Ниже приводятся основные данные.

Ниже приводятся основные технические данные варианта электрооптической съемочной камеры на преобразователе типа ПИМ-3.

1. Частота съемки от 10^5 до $5 \cdot 10^6$ кадров/сек.
2. Выдержка от $5 \cdot 10^{-8}$ до $5 \cdot 10^{-6}$ сек.

Съемка с помощью обычных электронно-оптических преобразователей

Многокадровая съемка с применением обычных электронно-оптиче-
ских преобразователей осуществляется путем получения одиночных
кадров на отдельных трубках. Экспонирование происходит в момент
падения на электроды преоб-
разователя высоковольтного
прямоугольного импульса на-
пряжения. Выдержка опре-
деляется длительностью при-
ложенного импульса. Ряд
кадров преобразователей по-
является за счет сдвига по
времени прямоугольных им-
пульсов, подаваемых на от-
дельные электронно-оптиче-
ские преобразователи.

Применение малогабаритных электронно-оптических преобразователей с катодами малого сопротивления диаметром 30 мм и электронным увеличением 1 : 1, удовлетворительно работающих в импульсном режиме, позволяет получать кадры размером 20×20 мм с разрешением до 100 линий/мм. Такие преобразователи позволяют создавать аппаратуру небольших размеров с высокой временной и оптической разрешающей способностью.

Схема управления камерой такого типа отличается простотой, надежностью, простотой обслуживания и большой точностью синхронизации с исследуемым явлением.

На рис. 6 показана принципиальная (а) и конструктивная (б) схемы генератора тройных импульсов. Высоковольтные импульсы формируются кабельной заряженной линией с тиратронным включателем. Длительность импульсов определяется длиной зарядных кабелей. Генератор сбавывает от синхронизирующего сигнала, поступающего от устройства

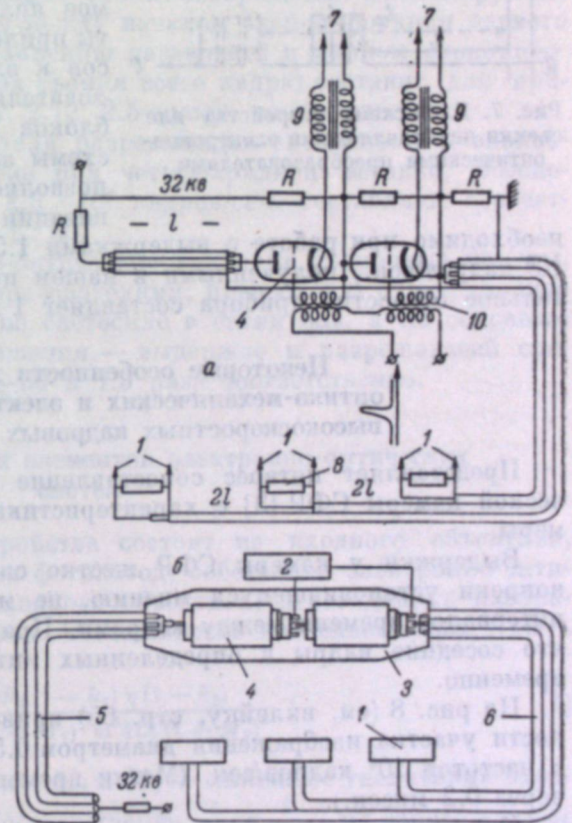


Рис. 6. Принципиальная (а) и конструктивная (б) схемы генератора тройных импульсов.

2 на импульсные трансформаторы двух последовательно включенных тиратронов 4 типа ТГИ-400/16. При этом путем разрядки кабелей предварительно заряженных до 32 кв, на соединительные кабели

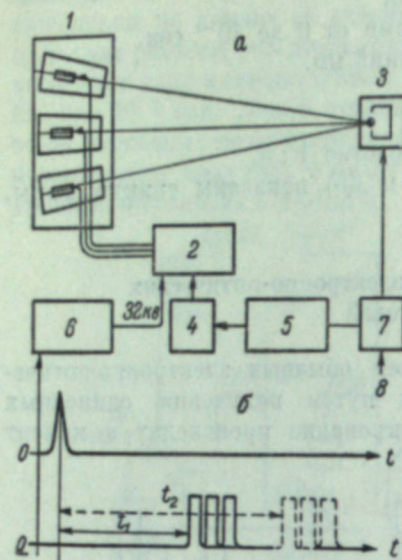


Рис. 7. Блок-схема устройства для съемки неуправляемыми электронно-оптическими преобразователями.

необходимо при работе с выдержками $1.5 \cdot 10^{-8}$ сек. и частотой 10^8 кадров/сек., полученными в нашем приборе. Эквивалентное отверстие прибора составляет 1 : 2.

Некоторые особенности характеристик оптико-механических и электронно-оптических высокоскоростных кадровых съемочных камер

Представляет интерес сопоставление характеристик оптико-механической камеры СФР [3] с характеристиками электронно-оптической камеры.

Выдержки у камеры СФР жестко связаны с частотами съемки, вопреки установившемуся мнению, не меньше, а значительно больше интервалов времени между кадрами. Практически это приводит к тому, что соседние кадры в определенных интервалах экспонируются одновременно.

На рис. 8 (см. вклейку, стр. 65) приведена осциллограмма освещенности участка изображения диаметром 0.5 мм при съемке камерой с частотой 10^6 кадров/сек. (Метки времени на осциллограмме нанесены через 0.2 мксек.).

Как видно, кривая освещенности представляет собой равнобедренный треугольник с полной длительностью 2 мксек. Эффективное время экспонирования [4] находится из

$$\int_0^{t_1} E(t) dt = \int_{t_2}^{t_0} E(t) dt = \frac{1}{10^4} \int_0^{t_0} E(t) dt,$$

где $E(t)$ — зависимость освещенности от времени, $h = \frac{S_{\max}}{S}$ — фотографическая широта материала, γ — коэффициент контрастности

материала, t_0 — полное время светового импульса, $t_2 - t_1 = t_{\text{эфф}}$ — эффективное время экспонирования, $t_{\text{эфф}} = t_0 \left(1 - \sqrt{\frac{2}{10^4}}\right)$.

Для наиболее широко используемых в скоростных камерах фотоматериалов [5] соответствующие этому случаю времена экспозиций приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип пленки	Фотографическая широта (практическая), h	$1 - \sqrt{\frac{2}{10^4}}$	Выдержка, $t_{\text{эфф}}$	$\frac{t_{\text{эфф}}}{t_{\text{съемки}}}$
Негатив Д	2.5	0.92	$1.84 \cdot 10^{-6}$ сек.	1.84
РФ1 . . .	2	0.86	$1.72 \cdot 10^{-6}$ сек.	1.72
РФ-3 . . .	1.5	0.75	$1.5 \cdot 10^{-6}$ сек.	1.5

В камере типа СФР отдельные точки изображения экспонируются разное время. Поэтому время между началом экспонирования первого участка изображения (по направлению развертки) и концом экспонирования последнего участка (время съемки всего кадра) составит для приращенного режима съемки 2.84, 2.72, 2.5 мксек. соответственно.

По данным завода-изготовителя разрешающая способность и эквивалентное относительное отверстие при четырехрядной вставке, обеспечивающей частоты съемки до $2.5 \cdot 10^6$ кадров/сек. составляют соответственно $16 \div 18$ линий/мм и 1 : 60.

Таким образом, электронно-оптические кадровые съемочные камеры, даже с самыми простыми преобразователями, превосходят существующие оптико-механические камеры по светосиле в сотни раз, а по основным показателям временного разрешения — выдержке и разрешающей способности изображения — в $20 \div 50$ и 1.5 раза соответственно.

О выборе характеристик элементов электронно-оптических систем

Электронно-оптические устройства состоят из входного объектива, преобразующего изображение на фотокатод, собственно электронно-оптического преобразователя и выходного объектива, переводящего изображение с экрана на фотоматериал. Освещенность последнего может быть представлена в виде

$$E = \frac{\pi B_0 (1 - k_1) \eta (1 - k_2)}{4 L_1^2 (1 + M_1)^2 m^2 4 L_2^2 (1 + M_2)^2}; \quad (1)$$

B_0 — яркость объекта съемки, M_1 и M_2 — линейные увеличения входного и выходного объективов соответственно; $\frac{1}{L_1}$ и $\frac{1}{L_2}$ — их относительные отверстия, k_1 и k_2 — коэффициенты потерь объективов, η — коэффициент переноса яркости преобразователя с увеличением, приведенным к 1 : 1, — его линейное электронное увеличение. Для однокаскадных электронно-оптических преобразователей $\eta = \pi \phi \gamma u$, где ϕ — чувствительность фотокатода в а/лм, γ — светоотдача экрана в св./вт, u — напряжение на преобразователе. По данным [6], приведенные к увеличению 1 : 1 коэффициенты усиления яркости преобразователя ПИМ-3 составляют 64 и 32 для вариантов с сурьмяно-цезиевым и кислородно-цезиевым фотокатодом соответственно.

Исходя из формулы (1), эквивалентное относительное отверстие тронно-оптической системы может быть получено в виде

$$\frac{1}{L_{\text{экв}}} = \sqrt{\frac{\eta(1-k_2)}{4L_1^2 L_2^2 (1+M_2)^2 m^2}}$$

Из анализа выражения (2) ясно, что светосила системы $\frac{1}{L_{\text{экв}}}$

с уменьшением m и M_2 . Правда, такому уменьшению кладет предел решающая способность как самого преобразователя, так и выходного объектива и фотоматериала. Однако, как видно из выражения (2), варьируя m и M_2 в известных пределах, так чтобы их произведение $M_2 m = 1$, можно, не снижая разрешающей способности системы, существенно повысить ее светосилу. При существующих в настоящее время раз-

фотокаатода, разрешающих способностях фотокаатода, экрана, объектива и фотоматериала оптимальное значение произведения $M_2 m$, по-видимому, равно или несколько больше единицы.

Таблица 2

m	M_2	$(1+M_2)^2 m^2$	$\frac{1}{L_{\text{экв.}}^2} / \frac{1}{L_{\text{экв. ПИМ-3}}^2}$	Примечания
4:1	1:4	25	0.36	ПИМ-4
2:1	1:2	9	1	ПИМ-3
1:1	1:1	4	2.25	
1:2	2:1	2.25	4	

Как видно из таблицы, электронное увеличение преобразователя ПИМ-3 и ПИМ-4 не является оптимальным.

Не менее важно и то, что с уменьшением m в m^2 раз уменьшается ходимая освещенность фотокаатода для той же степени почернения материала, что позволяет опуститься в область более коротких выдержек без перегрузки фотокаатода, т. е. без потери разрешающей способности. Особо следует остановиться на системах электронных затворов компенсационного типа [6] и затворы с запирающим потенциалом. Основное преимущество первых заключается в отсутствии нарушения четкости изображения в моменты запирающего и отпирающего за счет тельности фронтов импульсов. Однако как раз для наиболее коротких выдержек — именно тогда, когда длительность фронтов соизмерима с временем экспонирования и, следовательно, влияет на качество изображения — это преимущество реализовано быть не может. Дело в том, что компенсация без потери четкости имеет место только при подложке пластины затвора строго симметричных импульсов киловольтных амплитуд (из-за малой чувствительности компенсационного затвора). Изменение же сколько-нибудь коротких положительных импульсов приводит к трудностям. Расчеты и эксперименты показывают, что выдержки порядка $5 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-7}$ сек. могут быть осуществлены только однополярными отрицательными импульсами. Как оказалось, и для более длинных выдержек лучшего качества изображения легче достичь, применяя полярные импульсы, ибо технически много проще сильно сокращать фронты отрицательных импульсов, нежели формировать высокочастотные импульсы положительной полярности. В таком применении компенсационный затвор не имеет особого преимущества перед затвором с запирающим потенциалом. В то же время за счет в десятки раз большей чувствительности последнего коренным образом упрощаются условия формирования затворных импульсов.

В заключение авторы выражают глубокую признательность доктору технических наук М. М. Бутслову и сотрудникам его лаборатории за новую помощь, а также инженерам Ф. С. Новику, Г. Т. Баранову, И. Семенову за полезные консультации по отдельным вопросам и лаборантам В. А. Горину и Ф. Я. Николаеву, непосредственно участвовавшим в настоящей работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаут, Л. А. Любич. Запоминающие устройства на электронно-лучевых трубках, ВЭСМ АН СССР.
2. Мельников, Л. И. Артеменков, Ю. М. Голубев, ПТЭ, № 6, стр. 67, 1957.
3. Б. Ликаренко, УНФ, VI, 131, 1959.
4. А. Васильев, Е. А. Таранов, УНФ, VI, 113, 1959.
5. Войсва фотографических материалов на прозрачных подложках. Гостехиздат, 1955.
6. М. Бутслов, УНФ, VI, 76, 1959.

М. М. БУТСЛОВ, В. С. КОМЕЛЬКОВ,
Ю. Е. НЕСТЕРИХИН

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРИБОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ ПОЛУШИРИНЫ И ИНТЕНСИВНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Введение

В 1955 г. Фюнфер и Росслер осуществили магнитную развертку изображения на экране электронно-оптического преобразователя с фотокатодом на отклоняющие пластины «двойного преобразователя» поступало магнитным полем поперек щели и освещает катод фотоумножителя, для запуска развертки осциллографа ДЭСО-1, на экране которого с которого посылается на осциллограф. Запуск магнитной развертки осуществлялся выходной ток умножителя. При амплитуде отклоняющего напряжения на пластинах около 100 в. С этого же генератора снимался сигнал синхронизации с исследуемым процессом и разверткой осциллографа. Недостаток данного метода состоит в том, что в случае применения электронно-оптических преобразователей инерционность свечения экрана ограничивает возможную скорость записи до 10³ в. Большой интерес представляет совмещение этих двух устройств в одном приборе, так как при этом можно осуществить запись интенсивности и размера изображения (спектр, контур отдельной линии, разряда, сгустки плазмы и т. п.). по осциллограммам выходного фотоумножителя.

Такой прибор, названный нами «двойным преобразователем», необходим при спектральных исследованиях быстропротекающих явлений. В настоящей работе описаны конструкция и результаты исследования одного из первых образцов двойного преобразователя.

Конструкция прибора

Схема прибора приведена на рис. 1. Электронное изображение мощью электростатической линзы переносится на второй каскад преобразователя, усиливается и затем вторично переносится на диафрагму, которой расположены щель и электронный умножитель.

Второй каскад преобразователя имеет отклоняющие пластины перемещения изображения поперек щели.

В данном образце прибора щель (рис. 2) имеет высоту $h=10$ мм и ширину $l=0.1$ мм. Эти размеры не являются оптимальными и для каждого случая должны быть специально выбраны. Для определения полуширины спектральных линий ширину щели l целесообразно уменьшить до 0.05—0.03 мм, учитывая, что коэффициент усиления прибора и дисперсию спектрального прибора

в исследованном образце двойного преобразователя применена схема электронного умножителя ФЭУ-С с 13 каскадами. Питательное напряжение при съемке характеристик достигало 2.5 кв. Следует заметить, что линейность системы по выходному току оставляет желать лучшего. При токе порядка 0.3 ма уже наступает ограничение сигнала.

Схема управления, применяемая для записи характеристик прибора, указана на рис. 3.

На фотокатод прибора фокусировалось изображение микромет-

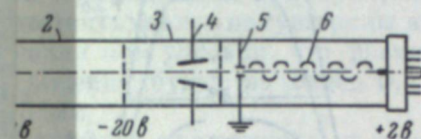


Рис. 1. Схема прибора.

1 — фотокатод; 2 — 1-й каскад электронно-оптического преобразователя; 3 — 2-й каскад электронно-оптического преобразователя; 4 — отклоняющие пластины; 5 — щель электронного умножителя; 6 — электронный умножитель.

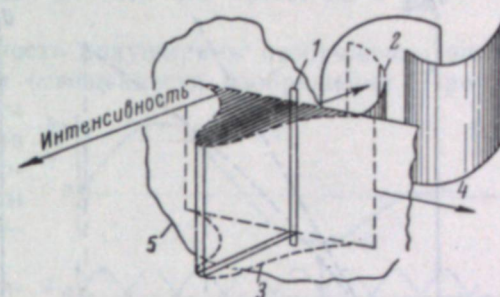


Рис. 2. Устройство и расположение щели.

1 — щель; 2 — амплитер умножителя; 3 — электронное изображение; 4 — направление перемещения изображения; 5 — диафрагма умножителя.

ской щели размером 0.4 мм в масштабе 1 : 1. Щель освещалась лампой накаливания в 20 вт, закрытой матовым стеклом. Пилообразное напряжение отклоняющих пластин «двойного преобразователя» поступало от генератора 104-И. С этого же генератора снимался сигнал синхронизации для запуска развертки осциллографа ДЭСО-1, на экране которого снимался выходной ток умножителя. При амплитуде отклоняющего напряжения на пластинах около 100 в. С этого же генератора снимался сигнал синхронизации с исследуемым процессом и разверткой осциллографа. Недостаток данного метода состоит в том, что в случае применения электронно-оптических преобразователей инерционность свечения экрана ограничивает возможную скорость записи до 10³ в. Большой интерес представляет совмещение этих двух устройств в одном приборе, так как при этом можно осуществить запись интенсивности и размера изображения (спектр, контур отдельной линии, разряда, сгустки плазмы и т. п.). по осциллограммам выходного фотоумножителя.

Примерные осциллограммы записи изображения щели показаны на рис. 4 (см. вклейку, стр. 80). Метки времени нанесены на осциллограммах с интервалом времени $5 \cdot 10^{-6}$ сек.

Характеристики прибора

Характеристики прибора определялись по осциллограммам изображений освещенной щели шириной 0.4 мм на фотокатод прибора. При этом световой поток изменялся в 20—25 раз с помощью промежуточной диафрагмы.

Как и следовало ожидать, осциллограмма выходного напряжения имеет форму трапеции (рис. 3, 4), так как при движении изображения щели умножителя электронный поток нарастает от нуля до максимальной величины за время $t = \frac{l}{v}$, где l — ширина щели, v — скорость развертки.

По форме и размерам осциллограммы можно судить об однородности изображения и резкости изображения. На рис. 4 показано отклонение осциллограммического изображения от идеального контура при выбранной ширине щели. Следует учесть, что электронное изображение не может

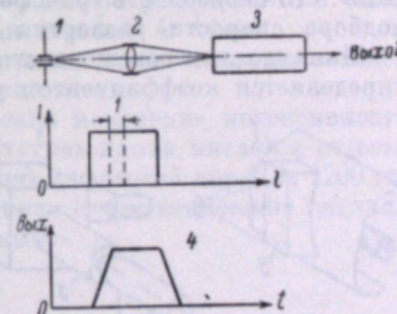


Рис. 3. Схема управления, применяемая для записи характеристик прибора.

1 — щель 0.4 мм; 2 — объектив; 3 — двойной преобразователь; 4 — идеальная осциллограмма.

быть получено более резким, чем это позволяет разрешение элементов оптического преобразователя, составляющее $20 \div 30$ линий/мм. Можно считать, что прибор удовлетворительно передает исследуемый объект изображения.

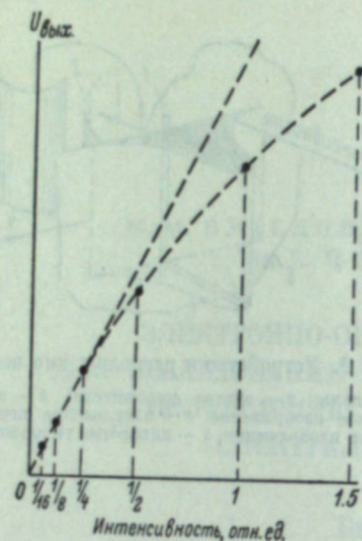


Рис. 5. Зависимость выходного напряжения прибора от интенсивности свечения изображения.

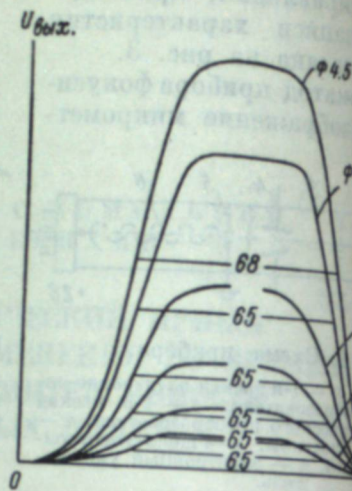


Рис. 6. Зависимость изменения полуширины щели при изменении интенсивности свечения изображения.

Необходимо отметить еще одну особенность «двойного преобразователя»: его способность трансформации изображений при соответствующем подборе скорости развертки изображения.

Минимальная освещенность, необходимая для уверенной регистрации, определяется коэффициентом усиления прибора и скоростью раз-

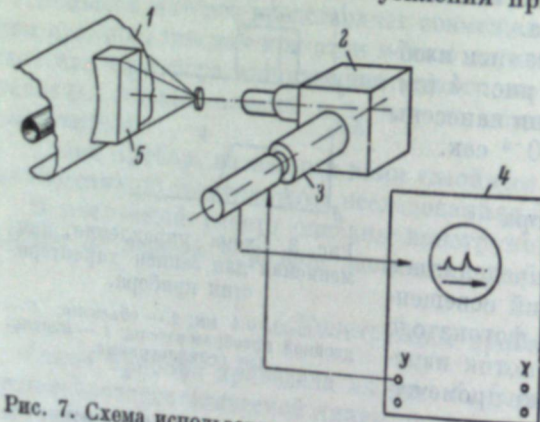


Рис. 7. Схема использования прибора в установке с импульсным разрядом. 1 — разрядник; 2 — спектрограф; 3 — двойной преобразователь; 4 — осциллограф; 5 — смотровое окно.

На рис. 5 показана эта зависимость в относительных единицах. С увеличением освещенности амплитуда сигнала растет пропорционально, пока не перейдет в нелинейную область токовой характеристики.

Область пропорциональности может быть значительно увеличена применением умножителя другого типа (ФЭУ-В, ФЭУ-13).

измерениях с данным образцом прибора при нагрузочном сопротивлении 12 ком выходное напряжение достигало $3 \div 3.5$ в. Минимальное время прохождения изображения составляло $3 \cdot 10^{-6}$ сек. Прибор работает удовлетворительно при времени регистрации более $(20 \div 50) \cdot 10^{-6}$ сек. Величина коэффициента усиления и применение умножителя улучшит систему, вероятно, позволит довести это время до $5 \cdot 10^{-7} \div 10^{-6}$ сек.

На рис. 6 представлена зависимость полуширины изображения щели размером в 0.4 мм при изменении освещенности изображения. Проведенные результаты показывают, что с этим образцом прибора можно достичь записи полуширины изображения при условии, что размеры изображения будут не менее $0.4 \div 5$ мм.

Измерение полуширины и интенсивности спектральной линии может быть проведено многократно в течение одного процесса согласно схеме на рис. 7, 8. Помимо пилообразного наложения, на развертку щели может быть подано синусоидальное напряжение, в котором используется его синусоидальная часть; запись полуширины и интенсивности происходит в каждом полупериоде развертки. При этом варианте значительно упрощается схема синхронизации, а синхронизация может быть опущена.

На рис. 9 (см. вклейку, стр. 80) на нижнем луче представлена осциллограмма контура линии ртути 4358 Å.

Для выделения линии был использован спектрограф ДФС-13 с относительным отверстием 1:40 и линейной дисперсией 4 Å/мм.

Верхняя запись представляет собой осциллограмму развертывающей линии со временем свивирования 250 мксек.

На рис. 10 (см. вклейку, стр. 80) показано изменение интенсивности линии ртути 4358 Å в течение процесса. Ртутная лампа питается от сети частотой в 50 гц, а свивирование происходит с частотой порядка 1200 гц. Света ртутной лампы недостаточно, в связи с чем отношение сигнала к шуму умножителя становится невыгодным.

Выводы

1. Результаты исследования характеристик двойного преобразователя подтверждают правильность принципиальной и конструктивной схемы прибора, а также указывают на возможность создания прибора с лучшими параметрами.
 2. Прибор испытанного типа может быть применен для регистрации процессов длительностью 500—1000 мксек.
 3. Для улучшения времени разрешения следует предусмотреть в подложных вариантах увеличение коэффициента усиления прибора на порядок и применить скоростной умножитель с линейностью по току $50 \div 100$ ма с временным разрешением $1 \div 5 \cdot 10^{-8}$ сек. (например, ФЭУ «Импульс»).
 4. Для увеличения пространственного разрешения необходимо увеличить разрешающую способность ЭОПа, доведя ее до $40 \div 50$ линий/мм, уменьшить щель до $0.03 \div 0.02$ мм.
- Авторы считают своим долгом выразить глубокую признательность Л. Мандельштаму и Г. Г. Долгову за ценную дискуссию и содействие в этой работе.

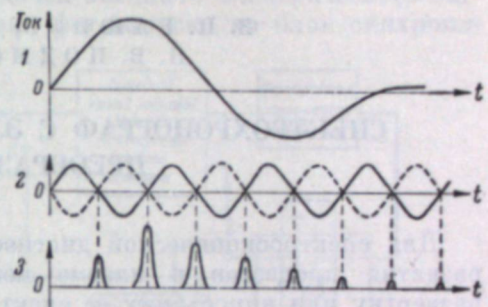


Рис. 8. Диаграмма работы прибора. 1 — разряд; 2 — развертка двойного преобразователя; 3 — осциллограмма линий во времени (полуширина и интенсивность).

СПЕКТРОХРОНОГРАФ С ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИМ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Для получения кадровой развертки изображения к вертикальным пластинам ПИМ необходимо приложить импульс на ступенчатой формы, который вызывает скачкообразное перемещение изображения по экрану. К затворным пластинам преобразователя

пектрохронограф запускается подачей внешнего электрического сигнала от выносной головки фотозапуска на блок синхрони-

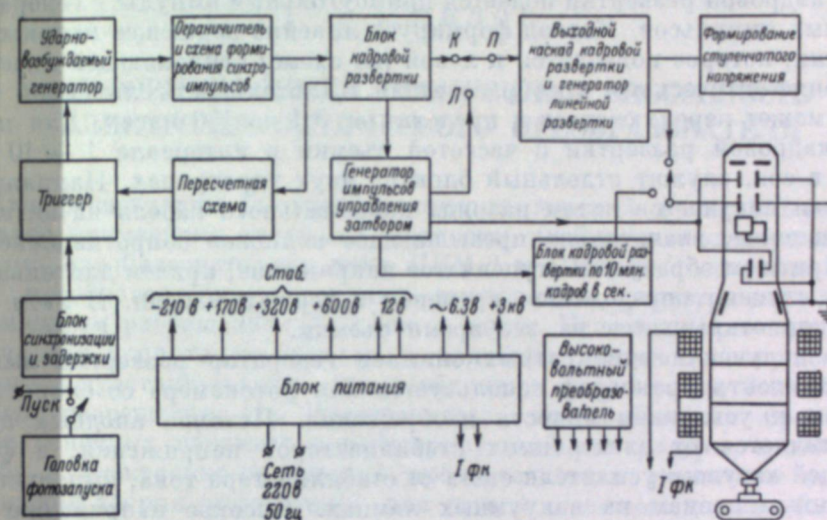


Рис. 1. Блок-схема спектрохронографа с электронно-оптическим преобразователем.

До начала съемки и после ее окончания, а также на время переброса изображения с кадра на кадр затвор ПИМ закрывается подачей постоянного напряжения на затворные пластины.

Ступенчатое напряжение кадровой развертки получается методом заряда конденсатора через диод короткими импульсами тока. При этом длительность импульса определяет фронт ступеньки (время переброса изображения с кадра на кадр), а период импульсов — длительность ступени (кадра). Переключая емкость конденсатора, можно изменять амплитуду ступенек, а, следовательно, и высоту кадра.

После прохождения 16 кадров с выхода пересчетной схемы на триггер подается импульс, возвращающий его в исходное состояние. Работа ударного генератора, управляемого триггером, прекращается.

В режиме линейной однократной развертки переключатель П устанавливается в положение «линейная развертка» Л. При этом на выходной каскад кадровой развертки подается прямоугольный импульс с генератора затворных импульсов. Каскад формирует линейно-падающее напряжение развертки, которое подводится к левой (на схеме) отклоняющей пластине электронно-оптического преобразователя. Длительность линейной развертки может перекрываться в пределах от 0.1 до 450 мксек. Для получения кадровой развертки с частотой съемки в интервале $1 \div 10$ млн кадров в сек. служит отдельный блок на двух тиратронах. Напряжение развертки получается путем разряда коаксиального кабеля на активное сопротивление, значительно превышающее волновое сопротивление кабеля. При этом образуется ступенчатое напряжение, причем длительность каждой ступени определяется временем задержки кабеля. В этом случае затвор открывается на все время съемки.

Для получения однократных снимков генератор развертки выключается и спектрохронограф используется как фотокамера со скоростным затвором и усилением яркости изображения. Питание анодных цепей осуществляется от электронных стабилизаторов напряжения, а фокусирующей катушки усилителя света от стабилизатора тока, выполненных по обычным схемам на вакуумных лампах. Высокое напряжение для электронно-оптического преобразователя получается с помощью преобразователя напряжения на полупроводниковых триодах. Преобразователь питается от 12-вольтового стабилизатора на полупроводниковых триодах, имеющего коэффициент стабилизации около 500.

Питание спектрохронографа осуществляется от однофазной сети переменного тока 220 в. Потребляется мощность около 700 вт. С экрана преобразователя изображение фотографируется фотокамерой типа «Зенит С» с объективом «Юпитер 3» на 35-мм пленку типа «Е» или «Панхром Х».

Действующий макет спектрохронографа в течение двух лет многократно использовался при спектроскопических исследованиях плазмы. С его помощью определялась теплоемкость плазмы дугового и мощного капиллярного разрядов, температура импульсного дугового разряда, развитие факела импульсного источника света ЭВ-39, импульсного плазматрона и др.

Для иллюстрации на рис. 2—5 (см. вклейку, стр. 81) приведены фотографии, полученные на спектрохронографе.

Опыт эксплуатации спектрохронографа показывает, что высокая чувствительность приборов с электронно-оптическими преобразователями, надежная электрическая синхронизация с явлением делают их незаменимыми при оптических исследованиях плазмы. В тех случаях, когда требовались точные измерения интенсивности в спектрах, данные спектрохронографа уточнялись осциллографированием интенсивности спектральных линий на скоростном спектрометре СП-64.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Бутслов, УНФ, VI, 76, 1959.

И. Ф. БАЛАШОВ, В. Р. МУРАТОВ,
Е. В. НИЛОВ

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Для регистрации быстротекущих явлений в настоящее время широкое применение получают установки, снабженные электронно-оптическими преобразователями типа ПИМ-3 и ПИМ-4. Электронно-оптические преобразователи позволяют производить регистрацию явлений с временным разрешением 10^{-8} сек. и выше. Использование электронно-оптических усилителей яркости в подобных установках существенно повышает чувствительность, что необходимо при съемке с большим временным разрешением [1]. Представляется целесообразным производить выбор основных параметров регистрирующей аппаратуры, включающей в себя и электронно-оптический преобразователь, используя основные положения теории информации, для чего вся система должна быть рассмотрена как канал связи.

В таком случае расчет оптической части регистрирующей установки заключается в количественной оценке информации, которая должна быть получена в данном акте регистрации, и сравнения этого количества с той информацией, которая фактически проходит через канал связи. В том случае, если соотношение между этими количествами лежит в пределах, определяемых принятым критерием, можно считать, что прибор в состоянии решить поставленную перед ним задачу.

Величина выбираемого критерия в существенной степени зависит от смысла передаваемой информации.

Математическая теория информации, лежащая в основе общей теории связи, не затрагивает смыслового содержания передаваемых сообщений, благодаря чему, собственно, и удается с единой точки зрения производить количественную оценку информации в сообщениях произвольного вида.

Поскольку на современном уровне знаний отсутствуют методы количественной оценки смыслового содержания информации в оптическом изображении, то методы теории связи весьма слабо используются при расчете оптических приборов вообще и аппаратуры высокоскоростной фотографии в частности. Однако и при существующем положении вещей применение основных положений теории информации может дать ценные указания, касающиеся выбора некоторых параметров регистрирующей аппаратуры.

Известно, что при наличии шумов в канале связи количество информации, которое может быть по нему передано, уменьшается.

Основная теорема для канала связи с шумами утверждает, что ошибка в передаче информации может быть сделана сколь угодно малой в том случае, если пропускная способность канала связи превышает количество передаваемой информации. Величина ошибки зависит от системы

кодирования поступающей информации. Следует отметить, что вопрос о кодировании поступающей в оптический прибор информации является для оптики новым и весьма слабо разработанным, хотя интенсивно развивающаяся отрасль прикладной оптики — волоконная оптика — представляет в этом отношении широкие возможности.

Известно, что между значениями яркости соседних элементов оптического изображения существуют значительные корреляционные связи. Благодаря этому оптическое изображение несет большое количество избыточной информации и оптический прибор как канал связи используется недостаточно эффективно. Однако, с другой стороны, низкая эффективность использования канала связи приводит к весьма высокой его помехоустойчивости, которая в оптических приборах проявляется в возможности наблюдения сильно искаженных изображений. Таким образом, рассмотрение вопроса о целесообразном кодировании изображения должно производиться с обязательным учетом требований к помехоустойчивости системы.

Вопрос о количественном расчете информации, которая содержится в подлежащих передаче изображениях, достаточно хорошо разработан в практике телевидения и в данной статье затронут не будет.

Рассмотрим вопрос об оценке пропускной способности электронно-оптического преобразователя как канала связи. В большинстве случаев количество информации, которое может быть получено с помощью аппаратуры высокоскоростного фотографирования, лимитируется параметрами электронно-оптического преобразователя, а именно площадью его фотокатода S , определяющей величину поля зрения прибора, разрешающей способностью R и числом передаваемых преобразователем градаций яркости m .

Распределение яркости в изображении объекта, спроектированного на фотокатод преобразователя, может быть представлено в виде суперпозиции двух взаимно перпендикулярно расположенных систем полос с изменением яркости в каждой полосе, подчиняющимся синусоидальному закону с периодом $1/N$, где N — число штрихов на единицу длины. Наличие у электронно-оптического преобразователя ограниченной разрешающей способности говорит о том, что в переданном преобразователем изображении будут отсутствовать мелкие детали, определяемые теми синусоидальными составляющими, для которых $N > R$. Здесь R — разрешающая способность, выраженная числом штрихов, приходящихся на единицу длины и находящихся на пределе разрешения.

В этом случае становится возможным применение теоремы Котельникова [2], которая в нашем случае сводится к утверждению, что распределение яркости в каждом из двух взаимно перпендикулярных направлений может быть однозначно задано значениями яркости в точках, отстоящих друг от друга на расстоянии $1/2R$. Общее число этих точек на площади фотокатода будет равно $4R^2S$. Если число передаваемых градаций яркости не зависит от линейных размеров деталей, измеряемых в значениях $1/N$ до тех пор, пока $N < R$, то общее число возможных комбинаций яркости на экране преобразователя будет m^{4SR^2} , а количество информации H , которое может передать электронно-оптический преобразователь по Хартли [3],

$$H = 4SR^2 \log_2 m, \quad (1)$$

где информация выражена в двоичных единицах (битах).

Пропускная способность канала связи определяется максимальным количеством информации, которое может быть передано в единицу времени. В отличие от обычных одноканальных систем связи, где определенное количество информации передается в течение некоторого времени, в установках с электронно-оптическим преобразователем вся информация

К ст. М. М. Бутлова и др.,
стр. 73—75.

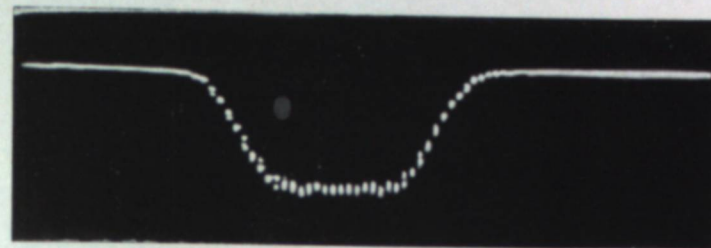


Рис. 4. Оциллограмма записи изображения щели шириной 0.4 мм.

Метки времени через $5 \cdot 10^{-6}$ сек.

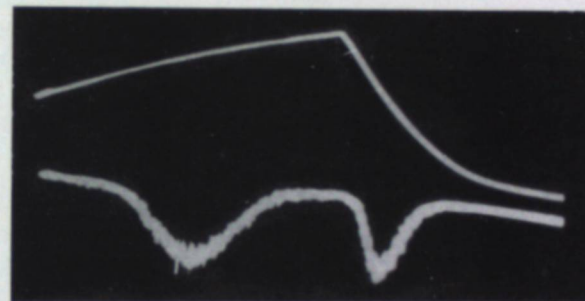


Рис. 9. Оциллограмма контура линии ртути 4358 Å.

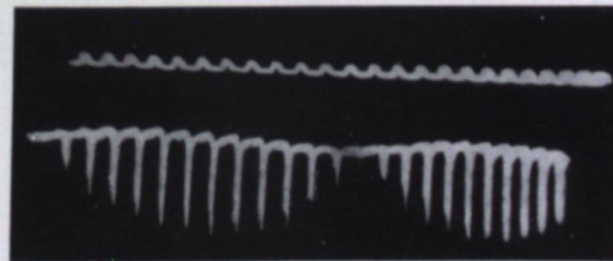


Рис. 10. Оциллограмма изменения интенсивности линии ртути во времени при питании ртутной лампы от сети 50 гц.



Рис. 2. Линейная развертка начальной стадии свечения мощного импульсного разряда в капилляре.



Рис. 3. Кадровая съемка факела импульсного источника света ЭВ-39.

Частота съемки 10^5 кадров/сек.

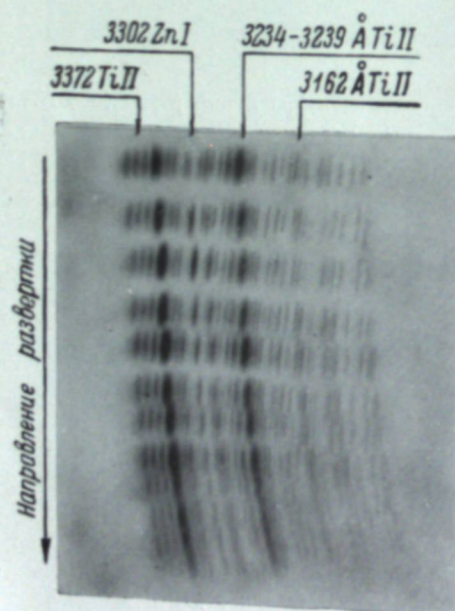


Рис. 4. Кадровая съемка участка спектра импульсов дуги.

Частота съемки 1000 кадров/сек.



Рис. 5. Кадровая съемка линии H_α .

Частота съемки 1000 кадров/сек.

о неподвижном объекте передается одновременно. Поэтому под пропускной способностью C аппаратуры для высокоскоростной фотографии будем понимать максимальное количество информации, отнесенное к величине поля зрения. Для ЭОПа пропускная способность будет выражаться равенством

$$C = \frac{H}{S} \quad (2)$$

или

$$C = 4R^2 \log_2 m \quad (3)$$

Анализируя формулу (3), можно сделать заключение, что для увеличения пропускной способности аппаратуры более целесообразно увеличивать разрешающую способность преобразователя, а не число градаций яркости, которое он может передать. Для реальных электронно-оптических преобразователей число градаций яркости m уменьшается по мере увеличения частоты штрихов N . Поэтому для оценки пропускной способности реального электронно-оптического преобразователя требуется нахождение количественного выражения $m = m(N)$, которое затем следует подставить в формулу (3).

Для этой цели нами были использованы частотно-контрастные характеристики электронно-оптических преобразователей, представляющие собой зависимость коэффициента передачи контраста K_N от числа штрихов в изображении периодической миры. Коэффициент передачи контраста определялся по формуле

$$K_N = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \cdot \frac{I_2}{I_1} \quad (4)$$

где ΔI_2 и ΔI_1 — амплитуды величины светового потока в изображении миры частоты N на экране и фотокатоде преобразователя соответственно, а I_2 и I_1 — средние значения этого потока.

В результате предыдущих работ [4, 5] было показано, что частотно-контрастные характеристики остаются неизменными в достаточно большом интервале изменения яркости в передаваемом изображении и действительно могут служить объективными показателями, определяющими способность преобразователя к передаче мелких деталей изображения.

Частотно-контрастные характеристики для одного из исследованных нами образцов преобразователя приведены на рис. 1. На графике приведены частотно-контрастные характеристики для режима постоянного

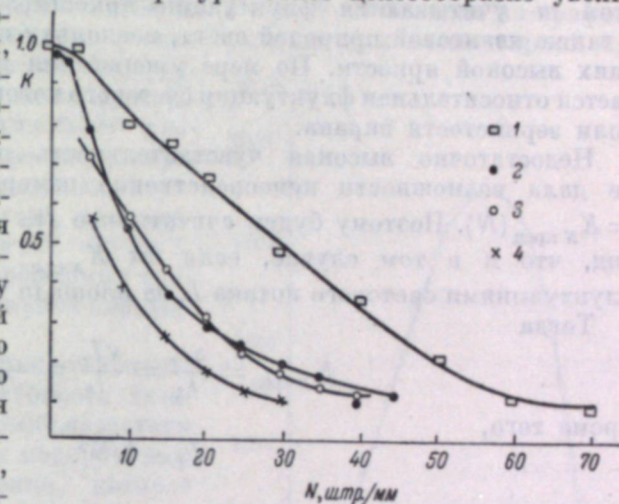


Рис. 1. Частотно-контрастные характеристики электронно-оптического преобразователя ПИМ-3.

1 — режим постоянного питания; 2 — $\tau = 6.5$ мксек., $\frac{\tau}{T} = 2\%$; 3 — $\tau = 2$ мксек., $\frac{\tau}{T} = 10\%$; 4 — $\tau = 2$ мксек., $\frac{\tau}{T} = 33\%$.

питания, а также для случая подачи двуполярного импульса на пластины затвора при различных соотношениях между длительностью фронта импульса и длительностью импульса τ/T . Из рис. 1 видно, что коэффициент передачи контраста уменьшается по мере увеличения числа штрихов N передо тех пор, пока при $N=R=40 \text{ мм}^{-1}$ не станет равным некоторому предельному значению $K_{N \text{ пред}} = 0.1$.

Причиной появления этого предельного контраста является, по нашему мнению, зернистая структура люминофора экрана преобразователя, вызывающая появление флуктуаций яркости в передаваемом изображении. Относительная величина этих флуктуаций возрастает по мере уменьшения размеров элемента изображения, подлежащего разрешению, но не зависит от абсолютного значения величины яркости экрана. При этом не учитываются флуктуации яркости, вызываемые термофоном, а также квантовой природой света, поскольку измерения ведутся в условиях высокой яркости. По мере уменьшения размеров детали увеличивается относительная флуктуация светового потока из-за увеличивающейся роли зернистости экрана.

Недостаточно высокая чувствительность применяемой аппаратуры не дала возможности непосредственно измерить величину $K_{N \text{ пред}} = K_{N \text{ пред}}(N)$. Поэтому будем считать, что эта зависимость имеет тот же вид, что и в том случае, если бы $K_{N \text{ пред}}$ определялся квантовыми флуктуациями светового потока I_2 на площади детали изображения $1/N^2$.

Тогда

$$K_{N \text{ пред}} = \frac{\Delta I_2}{I_2} = \frac{\sqrt{I_2}}{I_2} = \frac{1}{\sqrt{I_2}}, \quad (5)$$

кроме того,

$$I_2 \sim 1/N^2 \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получаем

$$K_{N \text{ пред}} = \text{const} \cdot N, \quad (7)$$

т. е. предельный контраст прямо пропорционален N .

Известно, что при $N=R=40 \text{ мм}^{-1}$

отсюда

$$\begin{aligned} K_{N \text{ пред}} &= 0.1, \\ K_{N \text{ пред}} &= 2.5 \cdot 10^{-3} N. \end{aligned} \quad (8)$$

Следует отметить, что предельный контраст, определенный по штриховой мере, несколько отличается от контраста, получаемого с двумерной «шахматной» мерой, значения которого должны быть подставлены в формулу (7). Тем не менее при оценке величины пропускной способности электронно-оптического преобразователя были использованы полученные ранее данные по значениям контраста для штриховой меры [5], так как оценка пропускной способности электронно-оптического преобразователя носит ориентировочный характер.

Для меры стопроцентного контраста ($\frac{\Delta I_1}{I_1} = 1$) значения коэффициентов передачи контраста (4) представляют собой значения контраста на экране преобразователя. Частотно-контрастные характеристики электронно-оптического преобразователя, относящиеся к $\tau/T = 2 \div 10\%$, могут быть аппроксимированы функцией

$$K_N = e^{-6 \cdot 10^{-2} N}. \quad (9)$$

В таком случае число градаций яркости, которое может передать преобразователь на квадратной площадке на фотокатоде со стороной $1/N$, будет

$$m = \frac{K_N}{K_{N \text{ пред}}}. \quad (10)$$

Теперь можно окончательно записать выражение для пропускной способности исследованного нами образца преобразователя. Подставляя (8), (9) и (10) в (3), получим

$$C = 4N^2 \log_2 \frac{e^{-6 \cdot 10^{-2} N}}{2.5 \cdot 10^{-3} N}. \quad (11)$$

На рис. 2 приведен график зависимости C от N . Как видно из графика пропускная способность сильно зависит от величины элементарной площадки, используемой для отсчета градаций яркости. Пропускная способность C электронно-оптического преобразователя, имеющего разрешающую способность 40 мм^{-1} в импульсном режиме включения, достигает максимума, равного 4500 дв. ед. при $N=25 \text{ мм}^{-1}$. В этом случае число разрешаемых градаций яркости на элементарной площадке равно 4.

Таким образом, для полного использования пропускной способности электронно-оптического преобразователя необходимо прибегнуть к кодированию передаваемого изображения, которое должно заключаться в искусственном перераспределении яркости с помощью некоторой кодирующей системы, включающей в себя, например, элементы волоконной оптики. Использование частотно-контрастных характеристик преобразователя позволяет не только рассчитывать его пропускную способность, но и установить конкретные характеристики кода, который должен быть применен для полного использования пропускной способности электронно-оптического преобразователя.

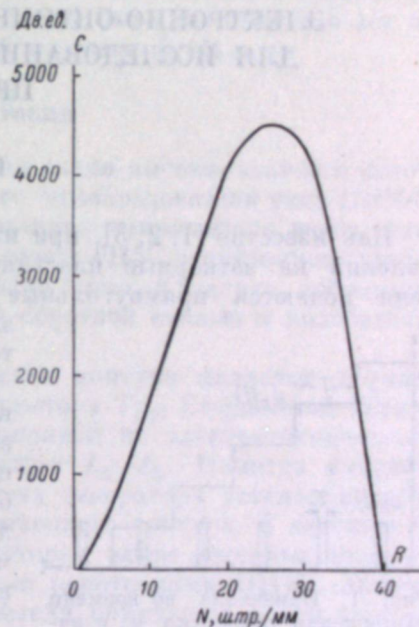


Рис. 2. Зависимость пропускной способности преобразователя от способа кодирования передаваемого изображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Бутслов, УНФ, VI, 76, 1959.
2. А. А. Харкевич. Теоретические основы радиосвязи. М., ГГИ, 1957.
3. Р. Хартли, сб. «Теория информации и ее приложения», Физматгиз, М., 1959.
4. В. Р. Муратов, Е. В. Нилов. Доклад на конференции, посвященной качеству фотографического изображения. М., 1962.
5. В. Р. Муратов, Е. В. Нилов, ПТЭ, № 2, 124, 1962.

Е. Н. БРАГО

СХЕМА ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

Введение

Как известно [1, 2, 3], при изучении быстропротекающих оптических явлений на затворные пластины электронно-оптического преобразователя подаются прямоугольные импульсы напряжения, открывающие электронное изображение на время длительности импульса напряжения.

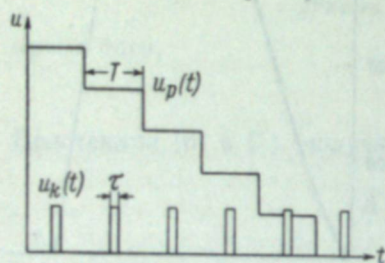


Рис. 1. Изменение во времени напряжения развертки u_p и напряжения на затворных пластинах u_k электронно-оптического преобразователя.

Пластины горизонтального и вертикального отклонений преобразователя позволяют осуществить различного рода пространственно-временные развертки изображения — ступенчатую, круговую, эллиптическую и т. д. Скорость развертки может быть доведена до $2 \cdot 10^7$ м/сек., а выдержка — до $10^{-9} \div 10^{-10}$ сек.

При покадровой съемке быстропротекающих процессов управление преобразователем осуществляется следующим образом. На пластины горизонтального отклонения подается симметричное ступенчатое напряжение развертки u_p (рис. 1), перемещающее изображение по экрану. Синхронно со ступенчатым напряжением на затворные пластины подаются симметричные прямоугольные кадровые импульсы напряжения u_k , которые открывают электронный затвор преобразователя на время экспозиции τ . Время экспозиции выбирается в несколько раз меньше, чем промежуток времени между отдельными кадрами — $\tau \ll T$.

На качестве изображения весьма существенно сказывается способ включения отклоняющих и затворных пластин. При несимметричном способе включения этих пластин краевые поля и поля рассеяния неизбежно вызывают различные дефекты отклонения и фокусировки. Это относится в первую очередь к электронно-лучевым системам с широким пучком электронов, к которым принадлежат и электронно-оптические преобразователи. Чем шире пучок электронного изображения, тем сильнее сказывается на его фокусировке неравномерное распределение потенциала между управляющими электродами и анодом.

При симметричном включении пластин расфокусировка пучка будет значительно меньше. Следовательно, во избежание потери четкости изо-

бражения при перемещении его по экрану управляющие напряжения должны быть строго симметричны. Нарушение симметрии напряжения на 10—15% приводит к двукратному сокращению числа разрешаемых линий в изображении на экране преобразователя.

Другим важным фактором, влияющим на качество изображения, является экранировка преобразователя от магнитных и электрических полей. Обычное разрешение преобразователя типа ПИМ-3 при отсутствии внешних полей достигает 30—40 штрихов на миллиметр. Если же под действием магнитного или электрического поля электронный луч за время экспозиции сместится всего на 1 мм, то проекция каждой точки изображения представится на экране кружком диаметром 1 мм, и разрешение упадет до 1 штриха на миллиметр. Желательно окружать преобразователь экраном из нескольких слоев отожженного пермаллоя толщиной 0.3—0.5 мм и медным или алюминиевым экраном толщиной 2—3 мм.

При изучении процессов чрезвычайно малой длительности требование к стабильности питающего напряжения может быть снижено. Но все же коэффициент стабилизации не должен быть ниже 0.1%.

Источник питания

На рис. 2 приводится принципиальная схема высоковольтного источника питания для электронно-оптического преобразователя типа ПИМ-3.

Постоянное напряжение от низковольтного выпрямителя через сглаживающий фильтр Dp_1 , C_1 и проходную лампу 6Н5С электронного стабилизатора напряжения подается на генератор высокой частоты, собранный на лампе ГУ-50 по схеме с индуктивной обратной связью и колебательным контуром в анодной цепи.

Катушка индуктивности колебательного контура является первичной обмоткой высокочастотного трансформатора Tr_1 . Стержневой каркас высококачественного трансформатора выполнен из электротехнического фарфора, на котором размещаются обмотки L_1-L_5 . Намотка катушек вторичного контура бескаркасная. Частота генератора устанавливается емкостью C_2 вблизи частоты резонанса выходного контура. В катушке L_3 индуцируется высокое напряжение, которое затем выпрямляется по обычной схеме удвоения высоковольтными кенотронами 1Ц11П. Максимальное напряжение на выходе выпрямителя получается в том случае, когда катушка обратной связи генератора индуктивно связана с вторичным контуром трансформатора. Поэтому конструктивно ее следует располагать около вторичного контура со стороны, противоположной анодному контуру ГУ-50. Накалы кенотронов питаются от обмоток L_4 и L_5 .

Выпрямленное напряжение подается на два плеча высокоомного делителя напряжения. Общее сопротивление делителя напряжения порядка 25 Мом. С отрицательного плеча делителя напряжение 18 кв подводится к катоду преобразователя. Потенциал катода можно изменять переменным сопротивлением R_7 на ± 250 в относительно фокусирующего электрода. Обычно фокусирующее напряжение регулируют только в случае смены преобразователя или при резком изменении питающего напряжения. С положительного плеча делителя напряжение снимается на разрядную лампу блока развертки.

Для нормальной работы высоковольтного блока питания требуется полное устранение короны. Особое внимание следует уделить подавлению высокочастотной короны на катушках и вводах трансформатора Tr_1 . Выходное стабилизированное напряжение регулируется потенциометром R_4 в пределах 600—750 в, напряжение высоковольтного выпрямителя при этом изменяется от 16 до 22 кв.

На рис. 3 приведена принципиальная схема высоковольтного источника питания для преобразователя с последующим усилением изображения

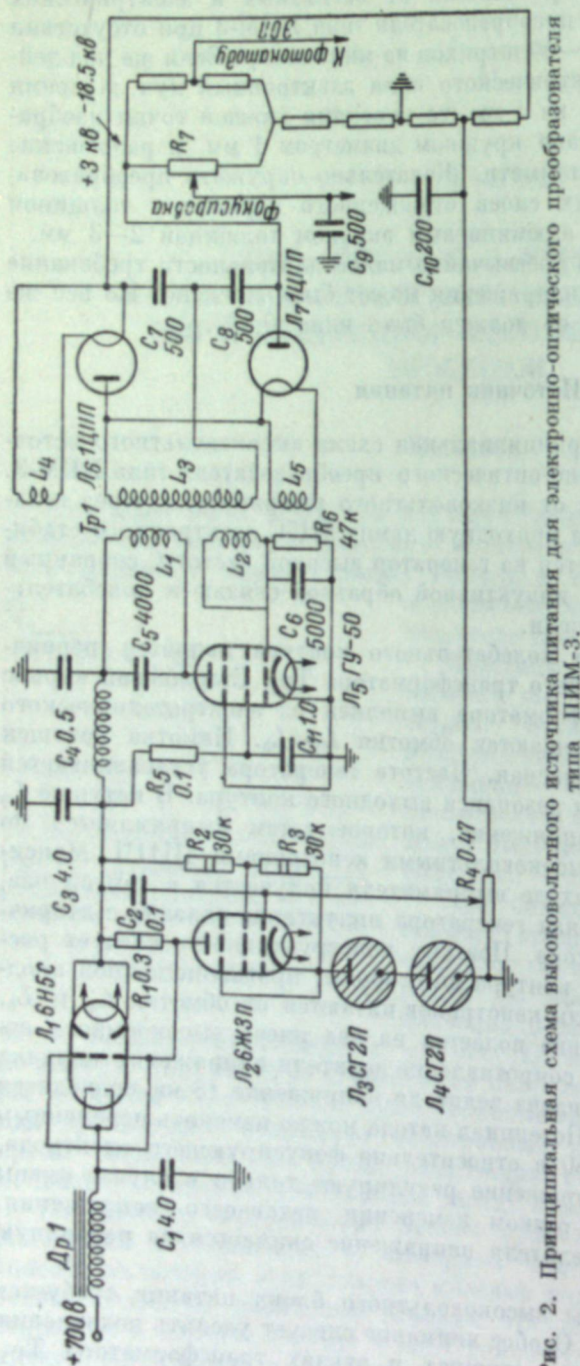


Рис. 2. Принципиальная схема высоковольтного источника питания для электронно-оптического преобразователя типа ПИМ-3.

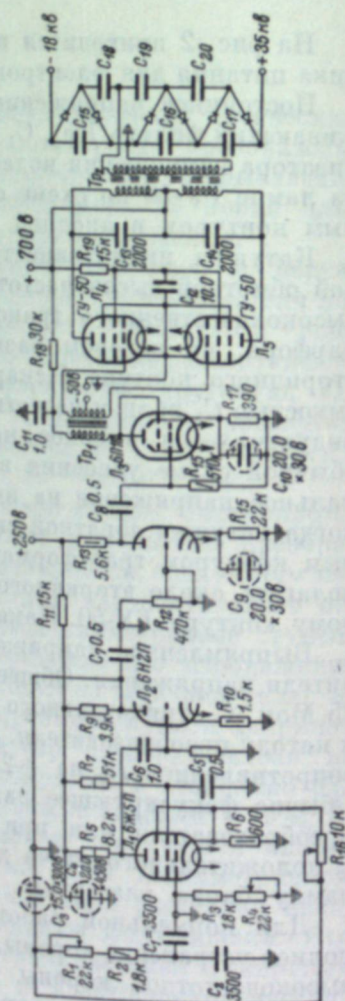


Рис. 3. Принципиальная схема высокоомного источника питания для электронно-оптического преобразователя с усилением изображения.

по яркости. Преобразователь работает на частоте $5 \div 6$ кгц. В качестве задающего генератора используется двухламповый RC -генератор (J_1 и $1/2 J_2$). Выходной повышающий трансформатор Tr_2 собран из ферритовых стержней от унифицированных строчных трансформаторов. Трансформатор дает на выходе около 8 кв при условии, что частота задающего генератора настроена в резонанс с анодной нагрузкой выходного каскада.

Выпрямление напряжения осуществляется по одноконтурной схеме умножения последовательного типа. В качестве вентильных элементов используются селеновые столбики типа ТВС-7-19-М. Нагрузкой высоковольтного выпрямителя служит омический делитель напряжения, с отпаек которого производится питание электродов преобразователя. Преобразователь обеспечивает на выходе напряжение порядка $50 \div 55$ кв при токе около 1 ма.

Постоянство высокого напряжения поддерживается электронным стабилизатором (рис. 2) путем регулирования напряжения в анодных цепях ламп Л₃, Л₄, Л₅. Управляющее напряжение на усилитель проходной лампы стабилизатора подводится от делителя напряжения, включенного на выход высоковольтного выпрямителя. Коэффициент стабилизации напряжения в такой схеме при изменениях напряжения сети равен 15, при колебаниях частоты задающего генератора — 10.

Надежность преобразователя значительно повышается, если повышающий трансформатор вместе с выпрямителем поместить в масло. При этом, естественно, значительно уменьшаются и габариты конструкции.

Формирование кадровых импульсов

Для однократного фотографирования очень быстрых процессов с выдержкой порядка $0.05 \div 0.5$ мксек. применяется схема, основанная на принципе разряда формирующей линии на согласованную нагрузку (рис. 4). Она выгодно отличается от широко применяемых формирующих элементов тем, что позволяет плавно менять длительность импульса, не прибегая к замене кабеля. Такая особенность схемы реализуется за счет применения двух коммутирующих элементов и замены обычной формирующей линии с разомкнутым концом, линией, нагруженной с двух сторон на согласующее сопротивление (R_1, R_2). Коммутирующими элементами являются водородные тиратроны Π_1 и Π_2 . В качестве формирующей линии используется отрезок кабеля длиной $l_k = 150$ м типа РК-150. Регулируя интервал времени между срабатыванием второго и первого тиратронов, можно получить на выходном согласующем сопротивлении R_1 прямоугольный импульс длительностью

$$0 < t \leq \frac{2l_E}{V_E},$$

где V_k — скорость распространения волны вдоль кабеля. Формирующая система помещена в контейнер, образуя вместе с кабелем коаксиальную систему, сводящую до минимума паразитные параметры схемы. Согласно сопротивлению нагрузки выполняются также в виде коаксиальной линии.

Однократное фотографирование процессов в диапазоне выдержек от 0.5 до 200 мсек. осуществляется при помощи кадровых импульсов, формируемых по схеме, изображенной на рис. 5. Импульсы такой длительности подаются на затворные пластины преобразователя также при фотографировании пространственно-временных разверток исследуемых процессов. Обычно длительность импульса устанавливается равной длительности прямого хода изображения по экрану. Этим устраняется нежелательное подсвечивание экрана вне интервала развертки.

Передний фронт прямоугольного импульса в схеме формируется тиратроном Л₁. Конденсатор С₂ заряжается через разделительное сопротив-

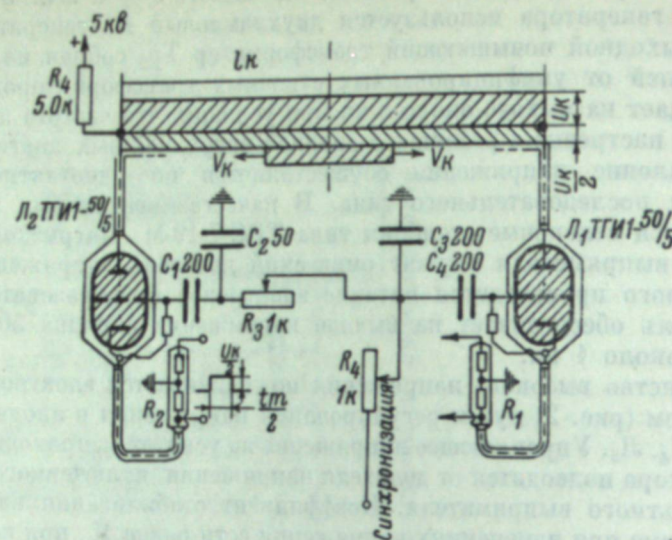


Рис. 4. Схема формирования однократных высоковольтных импульсов с помощью линии.

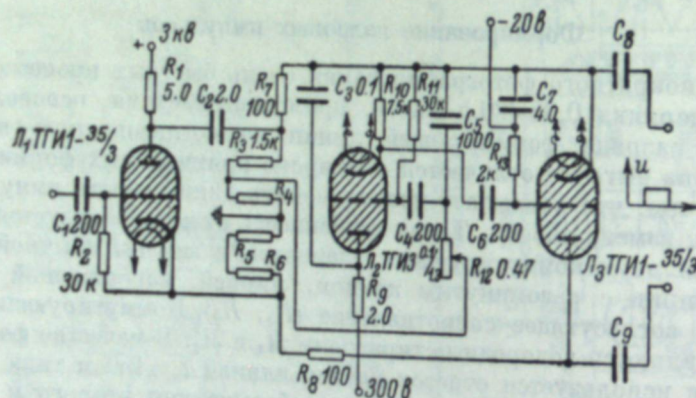


Рис. 5. Схема формирования кадровых импульсов для фотогра-
фирования с выдержками от 0.5 до 200 мсек.

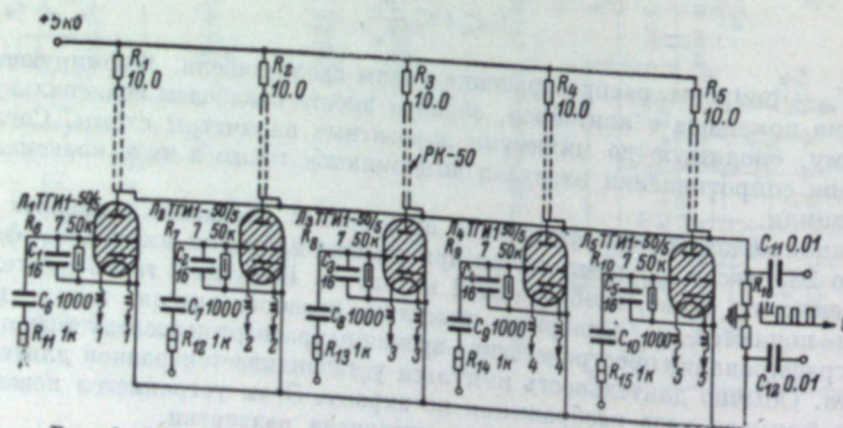


Рис. 6. Схема генератора для получения пятикадровых импульсов.

ление R_1 до напряжения 2.5 кв. Как только срабатывает тиратрон $Л_1$, на разрядном сопротивлении $R_3 \div R_6$ выделяется симметричный относительно земли импульс. Постоянная цепи разряда выбирается достаточно большой, чтобы на время экспозиции изображения на экране обеспечивалось необходимое постоянство напряжения кадрового импульса. Срез напряжения, т. е. формирование заднего фронта импульса, производится тиратроном $Л_3$.

Регулирование длительности импульса осуществляется потенциометром R_{12} цепи задержки. Поскольку для стабильного зажигания отсекающего тиратрона $Л_3$ требуется управляющий импульс с крутизной переднего фронта порядка 500 в/мксек., в цепи задержки предусмотрен дополнительный тиратрон $Л_2$, улучшающий форму импульса задержки. Для повышения стабильности работы в импульсном режиме тиратрона $Л_3$ на его управляющую сетку подается отрицательный потенциал, а сопротивление в цепи сетки снижается до нескольких килоом. Емкость C_7 поддерживает потенциал сетки относительно катода постоянным.

При покадровом фотографировании на затворные пластины электронно-оптического преобразователя подается серия прямоугольных управляющих импульсов, строго синхронизированных со ступенчатой временной разверткой. Формирование прямоугольных импульсов осуществляется унифицированными ячейками на тиратронах. Каждая такая ячейка состоит из формирующего кабеля, разряжающегося через тиратрон на волновое сопротивление. Включая синхронно в определенной последовательности с разверткой ряд элементарных ячеек, можно получить на выходе серию из желаемого числа импульсов. Например, генератор кадровых импульсов (рис. 6) содержит пять отрезков кабеля РК-150, заряжаемых через сопротивления R_1-R_5 до напряжения 5 кв. Кабели поочередно разряжаются через тиратроны $Л_1-L_5$ типа ТГИ1-50/5 на сопротивление R_{16} , равное волновому сопротивлению кабеля — 150 ом. Средняя точка сопротивления R_{16} заземлена. Через конденсаторы C_{11} и C_{12} импульсы снимаются на пластины электронного затвора. При длине отрезков кабеля 40 м и скорости распространения волны по кабелю $V_k = 2.5 \cdot 10^8$ м/сек. длительность импульсов равна 0.32 мксек.

При разрядке первого кабеля катод тиратрона $Л_1$, а соответственно и катоды всех остальных тиратронов получают положительный потенциал по отношению к своим сеткам, соединенным через линию задержки с «землей». В результате этого сетки не работающих в данный момент тиратронов получают отрицательные потенциалы, что исключает зажигание тиратронов.

Время между кадровыми импульсами можно изменять в пределах от 0.3 до десятка микросекунд подключением сеточных цепей тиратронов к различным точкам синхронизирующей линии задержки. Выдержка определяется длиной кабельных линий, формирующих отпирающие затвор импульсы, и может варьироваться в широких пределах начиная от 0.1 ÷ 0.3 мксек. Дальнейшее уменьшение выдержки ограничивается инерционностью тиратрона, так как время его зажигания приближается к длительности затворного импульса. Если уменьшить время зажигания тиратрона путем увеличения напряжения и крутизны фронта отпирающего импульса, то можно достичь выдержки порядка 0.05 мксек.

Для более полного согласования разрядных цепей тиратроны $Л_1-L_5$ заключены в коаксиальные экраны.

Формирование напряжений горизонтальной развертки

Ступенчатое напряжение горизонтальной развертки (рис. 1), необходимое при покадровом фотографировании, формируется серией последовательно соединенных унифицированных ячеек. Элементарной унифици-

рованной ячейкой, формирующей каждую ступень напряжения, является разрядная цепь, составленная из двух конденсаторов, разряжающихся через тиратрон на сопротивление. Так как кадровые импульсы синхронизируются с горизонтальными участками напряжения развертки, то для реализации, например, пяти кадров достаточно иметь всего четыре элементарных ячейки развертки. На рис. 7 приводится принципиальная схема такого генератора.

Конденсаторы C_1-C_5 и $C_{14}-C_{18}$ включены последовательно в разрядные цепи тиратронов $\Lambda_1-\Lambda_4$ типа ТГИ1-3/1 и заряжаются от общего делителя напряжения через разделительные сопротивления $R_{12}-R_{15}$.

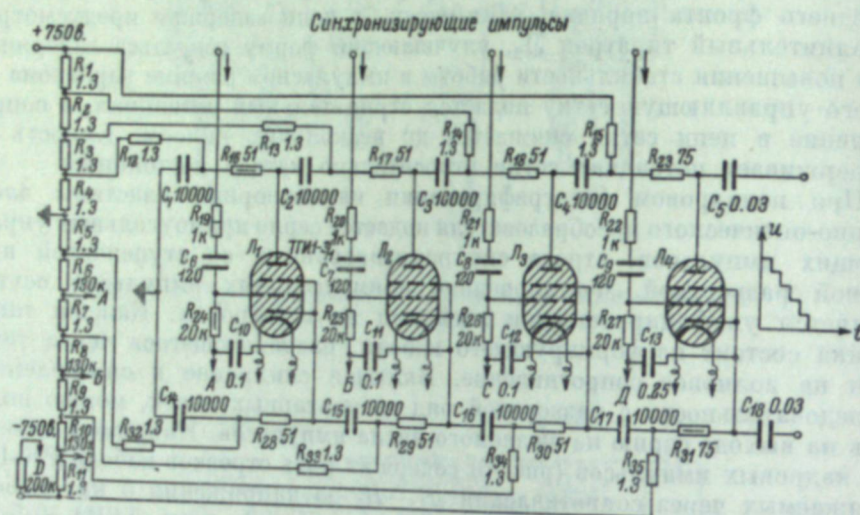


Рис. 7. Принципиальная схема генератора для съемки пяти кадров.

и $R_{32}-R_{35}$. Падение напряжения на сопротивлениях, включенных последовательно в разрядный контур ячеек, соответствует спаду, т. е. ступеньке напряжения на развертке. Величина ступеней напряжения развертки, а следовательно, и расстояние между кадрами изображения на экране электронно-оптического преобразователя определяются величиной напряжения, до которой заряжены емкости в каждой формирующей ячейке. Действительно, в начале развертки потенциалы на отклоняющих пластинах преобразователя максимальны. Изображение на экране отклонено в крайнее положение. При срабатывании первого тиратрона конденсаторы C_1 и C_{14} закорачиваются, и на соответствующее напряжение уменьшаются потенциалы на выходе ступенчатой развертки. Это соответствует формированию первой ступени напряжения. Аналогичным образом работают и последующие ячейки, тиратроны которых закорачивают конденсаторы C_2-C_{15} , C_3-C_{16} и т. д.

Очередность и момент зажигания тиратронов $\Lambda_1-\Lambda_4$ определяются местом включения сеточной цепи соответствующего тиратрона в синхронизирующую линию задержки.

Линейная развертка изображения во времени на экране преобразователя создается путем подачи на отклоняющие пластины импульса напряжения косоугольной формы. Формирование косоугольного импульса осуществляется по обычной схеме за счет разряда емкости на нелинейный пентод ГУ-50, не требующий подробных пояснений.

Вопросы синхронизации

Время зажигания t_3 у водородных тиратронов колеблется в пределах $0.1-0.15$ мксек. Этот параметр не влияет на точность синхронизации, но при некоторых условиях синхронизации он значительно усложняет

работу с преобразователем. Например, если синхронизация осуществляется от импульса, определяемого началом исследуемого процесса, то оптическая запись процесса может быть начата только спустя, по крайней мере, время t_3 . Если все же необходимо вести запись с начала развития процесса, то приходится прибегать к использованию различных задерживающих элементов. При работе с преобразователем в качестве задержки

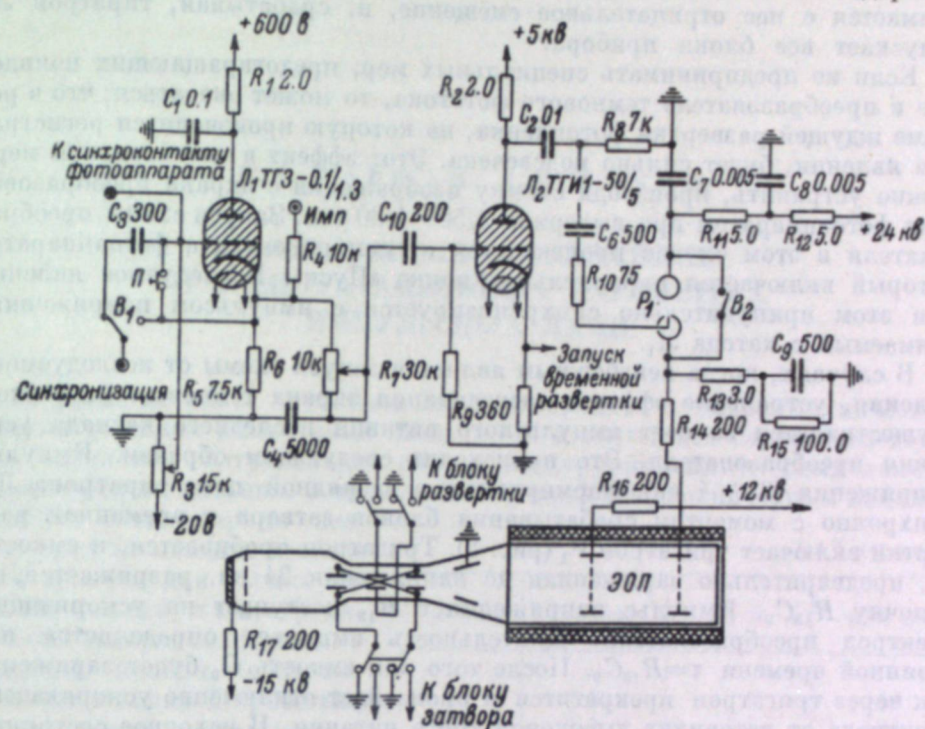


Рис. 8. Схема синхронизации.

оптического изображения может быть использована система зеркал. Время задержки определяется как

$$\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{V_c},$$

где $\sum_{i=1}^n l_i$ — суммарный ход лучей между зеркалами, V_c — скорость света.

Эта задержка должна быть, по крайней мере, меньше времени t_3 .

На рис. 8 показана схема синхронизации, выполненная на двух тиратронах Λ_1 и Λ_2 , осуществляющая пуск временной развертки генератора кадровых импульсов и блока импульсного питания.

В зависимости от положения переключателя В-1 блок синхронизации может запускаться внешним импульсом положительной либо отрицательной полярности. Внешний синхронизирующий импульс запускает тиратрон Λ_1 , с катодной нагрузки которого R_5 снимается положительный импульс с крутым фронтом. Этот импульс через регулирующую цепочку задержки времени (R_6, C_4) запускает следующий тиратрон Λ_2 , в цепи которого формируется импульс высокого напряжения, необходимый для запуска всех блоков прибора. Катодной нагрузкой этого тиратрона является делитель напряжения (R_8, R_9), с части которого R_8 подается импульс на запуск блока затвора и временной развертки, с сопротивления в цепи анода R_9 снимается импульс, поджигающий триггер P_1 схемы

импульсного питания преобразователя. С катодной нагрузки тиратрона L_1 импульс напряжения подается также на синхронизацию дополнительной электронной аппаратуры, работающей параллельно с преобразователем.

Для запуска схемы от руки предусмотрена кнопка пуска П. При помощи этой кнопки закорачивается на землю сетка тиратрона L_1 , т. е. снимается с нее отрицательное смещение, и, срабатывая, тиратрон L_1 запускает все блоки прибора.

Если не предпринимать специальных мер, предотвращающих появление в преобразователе темнового фототока, то может оказаться, что в режиме ждущей развертки фотопленка, на которую производится регистрация явления, будет сильно подсвечена. Этот эффект в значительной мере можно устранить, производя съемку изображения с экрана преобразователя фотоаппаратом при выдержке 1/50—1/30 сек. Запуск схемы преобразователя в этом случае производится от синхроконтakta фотоаппарата, который включается параллельно кнопке «Пуск». Исследуемое явление при этом принудительно синхронизируется с импульсом напряжения, снимаемым с катода L_1 .

В случаях, когда неизбежным является запуск схемы от исследуемого явления, устранение эффекта засвечивания экрана темновым фототоком осуществляется за счет импульсного питания последнего каскада усиления преобразователя. Это происходит следующим образом. Импульс напряжения ($3 \div 4$ кв), формируемый в разрядной цепи тиратрона L_2 , синхронно с моментом срабатывания блоков затвора и временной развертки включает тригatron P_1 (рис. 8). Тригatron пробивается, и емкость C_7 , предварительно заряженная до напряжения 24 кв, разряжается на цепочку $R_{13}C_9$. Импульс напряжения с R_{13} поступает на ускоряющий электрод преобразователя. Длительность импульса определяется постоянной времени $\tau = R_{13}C_9$. После того как емкость C_9 будет заряжена, ток через тригatron прекратится и произойдет отключение ускоряющего электрода от источника высоковольтного питания. В исходное состояние схема возвращается после разряда емкости C_9 на сопротивление утечки R_{15} .

Описанные схемы управления преобразователя были конструктивно оформлены в виде прибора — зонографа.

Использование зонографа позволило существенно усовершенствовать оптические исследования длинной электрической искры. Более того, удалось экспериментально зафиксировать и описать ряд новых явлений в развитии электрического разряда [4, 5, 6]. Значительно расширились также и возможности анализа экспериментального материала, так как развитие оптических процессов стало возможным сопоставлять с синхронно записанными осциллограммами тока и напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Бутслов, УНФ, VI, 76, 1959.
2. Е. К. Завойский и С. Д. Фанченко, ДАН СССР, 108, № 2, 1956.
3. Е. Н. Браго, Вестн. АН СССР, № 3, 1959.
4. Е. Н. Браго, Изв. АН СССР, № 4, 1958.
5. И. С. Стекольников, ДАН СССР, 141, № 5, 1961.
6. И. С. Стекольников, А. В. Шкилев, ДАН СССР, 145, № 4, 1962.

ИСТОЧНИКИ СВЕТА

И. С. МАРШАК, Л. И. ЩУКИН

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ФИЗИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРАХ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП

В развитие ранее опубликованных материалов о физико-технических характеристиках импульсных ламп [1—9] в настоящей серии исследований изучались экстремальные случаи конструкций импульсных ламп и параметров их питания, а именно ламп с наиболее ограниченным каналом разряда (капиллярные лампы, представляющие особый интерес для съемки по методу свилей) и с неограниченным разрядом (лампы с шаровой колбой, обладающие максимальной яркостью, минимальной длительностью вспышки и наиболее сжатым светящимся объемом). В последнем случае особое внимание обращалось на достижение максимальной скорости поступления энергии в канал разряда за счет возможного сокращения индуктивности разрядного контура.

Таблица 1

d , мм	c , мкф	u , кв	$ca^2/2$, дж
1	0.5	1.5	0.56
0.5	0.1	1.5	0.11
0.3	0.025	0.8	0.008

Изучение разрядов в капиллярах осуществлялось на кварцевых и стеклянных лампах с внутренним диаметром разрядной трубки $d=0.2 \div 1.1$ мм и длиной (не считая расширенных участков около электродов) $l=10 \div 100$ мм. Лампы наполнялись ксеноном, криптоном или аргоном до давления $p=50 \div 920$ мм рт. ст. Питание ламп осуществлялось от накопительных конденсаторов емкостью от 0.05 мкф до нескольких десятков мкф, заряжавшихся до напряжения от нескольких сот вольт до нескольких киловольт. При работе ламп в стробоскопическом режиме для предотвращения перехода разряда в стационарный режим обеспечивалась пауза тока в цепи заряда конденсатора, необходимая для деионизации газа.

В табл. 1 приведены параметры питания, необходимые для заполнения каналом разряда капилляров разных диаметров (ксенон, $p=600$ мм рт. ст., $l=70$ мм). Данные получены путем фотографирования одиночных разрядов в капилляре. При равных энергиях вспышки разряды с большим напряжением и меньшей емкостью несколько хуже заполняют капилляр, чем разряды с обратным отношением параметров. Данные табл. 1 согласуются с результатами осциллографических исследований разрядов, дающих совпадение возрастающих ветвей вольтамперных характеристик при заполнении капилляра разрядом [4].

На рис. 1 приведены графики зависимости удельного сопротивления ρ плазмы разряда от электрического градиента E для капилляров разных диаметров и для широких трубчатых ламп [4]. Из рис. 1 следует, что электрические характеристики разряда в капиллярах подобны полученным ранее для трубчатых ламп за исключением того, что удельное сопротивление начинает заметно возрастать при в 3 ÷ 4 раза более высоких

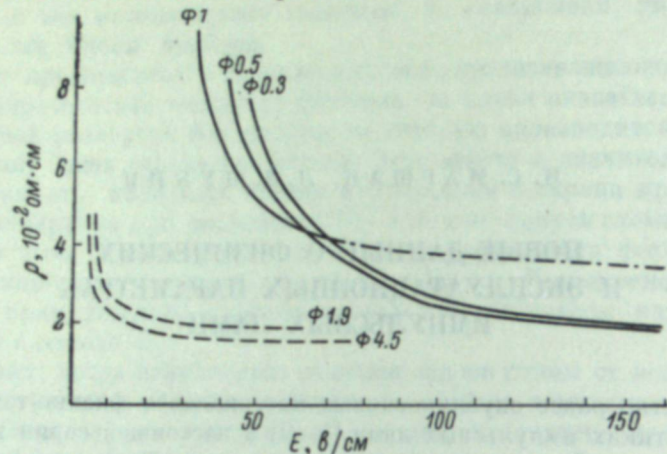


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления плазмы от электрического градиента для трех диаметров капилляра (сплошные линии, ксенон, $p=600$ мм рт. ст., $l=70$ мм, C до 0.5 мкф, U до 1.5 кв).

Штрих-пунктиром показана область значений для $d=1$ мм, повышенных из-за незаполнения капилляра. Пунктир — та же зависимость для широких трубчатых ламп [4].

электрических градиентах. В практических расчетах, относящихся к градиентам > 100 в/см, можно пользоваться приближенным значением $\rho=0.02$ ом/см. При $E > 100$ в/см ρ для ксенона на 10—20% выше, чем для аргона. Уменьшение давления газа от 600 до 100 мм рт. ст. снижает ρ на $\approx 30 \div 50\%$.

Напряжение погасания разряда, как и следовало ожидать [2], быстро возрастает с уменьшением d и увеличением p и l (рис. 2), а напряжение

Таблица 2

Род газа	τ , мксек.	I_a , св	Освещивание, св./сек.
Ксенон	21.4 ± 1.1	7900 ± 280	0.15
Криптон	19.4 ± 1.8	5100 ± 280	0.082
Аргон	12.6 ± 0.4	2200 ± 260	0.024

его зажигания слабо зависит от диаметра капилляра, формы и положения внешнего зажигающего электрода, прямо пропорционально длине капилляра, корню квадратному из давления и обратно пропорционально величине зажигающего импульса (рис. 3). Напряжение неуправляемого пробоя, имеющее большой разброс (особенно когда на лампу не надет зажигающий электрод), превышает напряжение управляемого зажигания в 5 ÷ 15 раз (возможный пробой) и в 10 ÷ 30 раз (надежный пробой). Без зажигающего электрода оно возрастает еще в 1.5 ÷ 2 раза.

Произведение амплитудной силы света на длительность вспышки, измеренную на уровне 35% амплитуды, для капиллярных ламп, так же как и для широких трубчатых ламп, равно освещиванию вспышки, делен-

ному на достаточно постоянный для всех ламп и режимов коэффициент $k=0.86 \pm 0.02$. Амплитудная сила света и длительность вспышки τ примерно пропорциональны атомному номеру инертного газа, что видно, например, из табл. 2, в которой представлены характеристики ламп с $d=0.5$ мм, $l=70$ мм, $p=600$ мм рт. ст. при $C=0.25$ мкф, $U=1.2$ кв.

I_a имеет максимум при давлении $p \approx 100$ мм рт. ст., потом несколько снижается с ростом давления и при приблизительно 500 мм рт. ст. перестает зависеть от давления (рис. 4).

Длительность вспышки растет с увеличением давления до ≈ 500 мм рт. ст. и затем также становится постоянной. Освещивание монотонно растет с увеличением давления до ≈ 300 мм рт. ст., а при больших давлениях от него не зависит. С увеличением диаметра капилляра амплитуда силы света растет линейно, а освещивание быстро увеличивается до $d=0.5$ мм, но затем его рост замедляется (рис. 5).

Влияние длины капилляра сказывается на светоотдаче для ламп короче 70 мм. Сумма приэлектродных падений напряжения (включая падения в расширениях около электродов), определенная путем сравнения светоотдачи ламп разной длины [8], составляет ≈ 150 в, примерно в 3 раза превышая аналогичную величину для широких трубчатых ламп.

При продольном электрическом градиенте < 250 в/см светоотдача η быстро растет с напряжением, а при $E \geq 400$ в/см она доходит до предельного значения ≈ 3.2 св. сек./дж (рис. 6). Рост емкости питающего конденсатора вызывает рост светоотдачи до $C \approx 1$ мкф (рис. 7). Полученные значения светоотдачи капиллярных ламп при больших электрических градиентах превышают светоотдачу шаровых ламп и доказывают, что капиллярные лампы смогут найти широкое применение при скоростной съемке.

Индуктивность разрядного контура, не превышающая 100 мкГн, не оказывает практического влияния на световые характеристики ламп, а увеличение ее до 2500 мкГн увеличивает длительность вспышки примерно в 2 раза, снижает освещивание примерно на 30% и соответственно снижает амплитудную силу света примерно в 3 раза.

Обширный материал, накопленный для капиллярных и широких трубчатых ламп в отношении зависимости длительности вспышки τ (на уровне 35% максимума силы света), от d , C , l и E , позволил составить номограмму для определения τ , представленную на рис. 8. Как видно из рис. 8, в узких пределах варьирования параметров можно криволинейный график рассматривать как прямую и, таким образом, пользоваться формулой, подобной ранее приводившейся в литературе [10]:

$$\tau = Au_0^{-0.5} (cl)^2 d^{-2}, \quad (1)$$

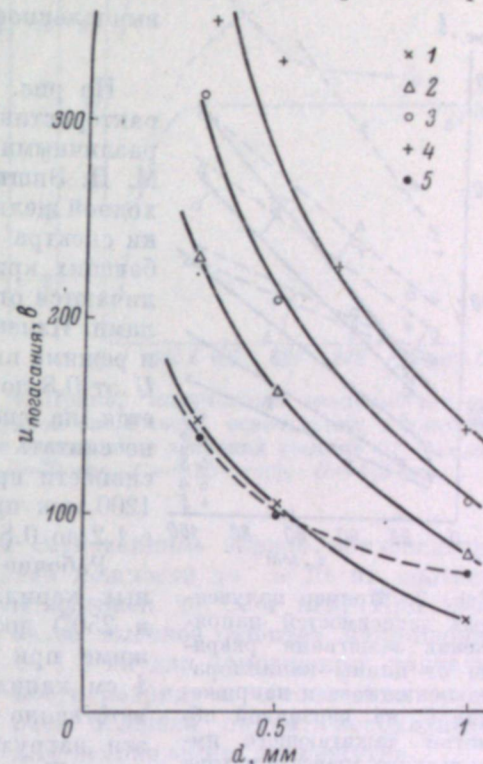


Рис. 2. Пример полученных зависимостей напряжения погасания разряда от диаметра и давления газа и длины капилляра в ксеноне.

1 — $p=100$ мм рт. ст., $l=70$ мм; 2 — $p=300$ мм рт. ст., $l=70$ мм; 3 — $p=600$ мм рт. ст., $l=70$ мм; 4 — $p=920$ мм рт. ст., $l=70$ мм; 5 — $p=600$ мм рт. ст., $l=20$ мм.

фициенты (при $\tau \geq 50$ мксек. они примерно равны 0.5, при $\tau \geq 500$ мксек.

$p \simeq 1$, $q \simeq 2$, что соответствует пропорциональности между τ и постоян-

6. вычисленное по формуле $R \equiv \frac{\rho l}{\pi}$).



Рис. 3. Пример получения

Сплошная линия — $U_{\text{подж}} = 1200$ в, пунктирная — $U_{\text{подж}} =$

1 — $P = 50$ мм рт. ст.; 2 — 100 мм рт. ст.; 3 — 300 мм рт. ст.; 4 —

грузкам кварцевых ламп с внутренним диаметром 2 мм [5].

Запаздывания вспышек ламп относительно

На рис. 10 представлены графики $\eta_{\text{н}} = \eta_{\text{н}}(U_{\text{н}})$ в указанном диапазоне.

вычисленное по формуле $R = \frac{\rho l}{\pi}$).

На рис. 9 представлены спектральные ха-

Рабочие температуры кварцевых и стеклянных

нагрузки кварцевых капилляров, близки к на-

от 0.5 до 15 мм.

... в указанном диапазоне.

было равно напряжению погасания разряда). Вследствие того что при больших рассеиваемых в лампе мощностях и низких напряжениях питания продолжительность разряда становится сравнимой по величине

с частотой вспышек до 12 кгц (при «мгновенном» заряде конденсатора

Изучение разрядов с коротким

выполненных в виде двух вваренных
в стекло параллельных коваровых

Осциллографирование различных разрядных контуров показало, что

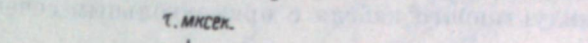


Рис. 4. Пример полученных зависимостей ам-

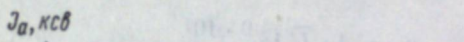


Рис. 5. Зависимость амплитудной силы

5 мм и диаметром 0.3 мм имеет $L=3.3$ нгн). Параллельное соединение цилиндрических конденсаторов посредством коаксиальных контактных цилиндров, а также соединение лампы с конденсатором посредством малоиндуктивного кабеля с прямоугольным сечением увеличивает L на 10 ÷

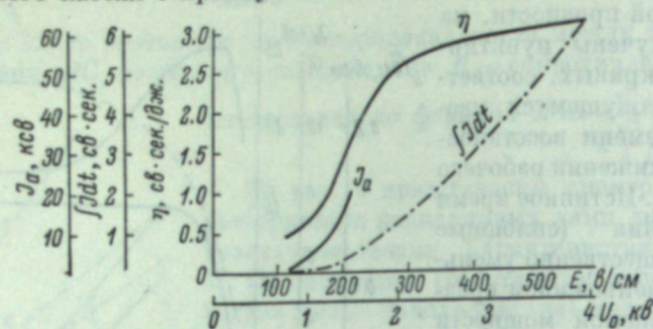


Рис. 6. Зависимость амплитудной силы света, освещения и светотдачи от E в ксеноне ($p=600$ мм рт. ст., $d=0.5$ мм, $l=70$ мм, $C=0.25$ мкф).

20 нгн. Применение коаксиальных сопротивлений ≈ 1 ома увеличивает L на ≈ 2 нгн.

Исследование расширения канала разряда, выполненное с помощью скоростной растровой киносъемочной камеры ЛИКИ [10], показало, что картина расширения согласуется с данными других авторов, полученными при больших L . Начальная скорость увеличения радиуса канала не зависит от C и меняется с U и L по закону

$$v_0 = A \sqrt{U} \lg \frac{9 \cdot 10^4}{L^{1/2}} \quad (2)$$

(U в кв, L в нгн, v_0 в мм/мксек.; A для $\text{Xe} + 20\% \text{H}_2$ равно 0.37, для $\text{Kr} + 20\% \text{H}_2$ — 0.4, для $\text{Ar} + 20\% \text{H}_2$ — 0.45). Помимо v_0 , процесс расширения может

быть охарактеризован величиной $\left(\frac{t}{d^2}\right)_{\min}$, являющейся мерой быстроты достижения максимального диаметра $d_{\max}$ (на рис. 12 приведен пример графика изменения $\frac{t}{d^2}$ со временем). Эмпирические зависимости

Рис. 7. Зависимость светотдачи от C ($U=1.2$ кв, остальные параметры те же).

$\left(\frac{t}{d^2}\right)_{\min}$ и соответствующих значений $t_{\text{кр}}$, $d_{\text{кр}}$ и $d_{\max}$ от параметров имеют вид ($\text{Xe} + 20\% \text{H}_2$, 3 атм., $l=5$ мм):

$$\left(\frac{t}{d^2}\right)_{\min} = \frac{30}{\sqrt{CU^2}} + 0.12(L-120); \quad (3)$$

$$t_{\text{кр}} = 2.45 + 0.007CU(L-120); \quad (4)$$

$$d_{\text{кр}} = 0.24 \sqrt{CU}; \quad (5a)$$

$$d_{\max} = 1.22 d_{\text{кр}}. \quad (5b)$$

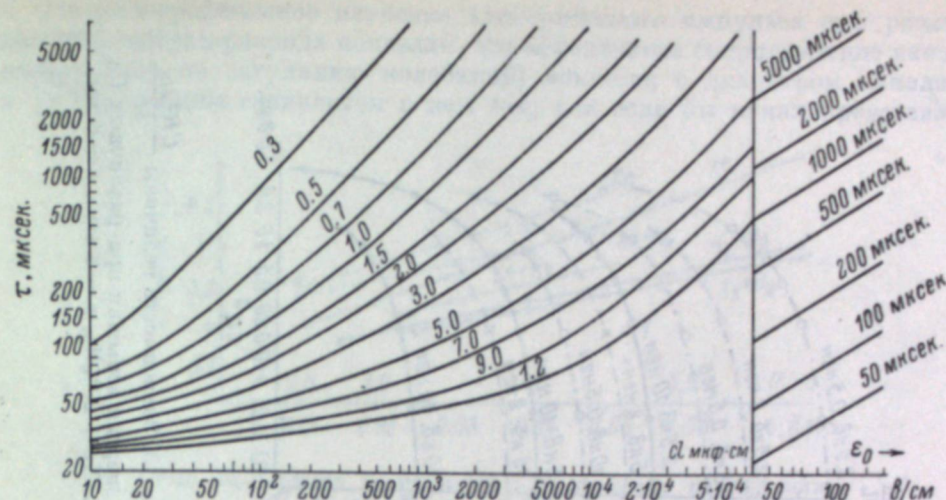


Рис. 8.

Слева — семейство зависимостей τ от $C l$ при разных d и начальном электрическом градиенте $E_0=100$ в/см; справа — сдвиг шкалы ординат при изменении начального градиента.

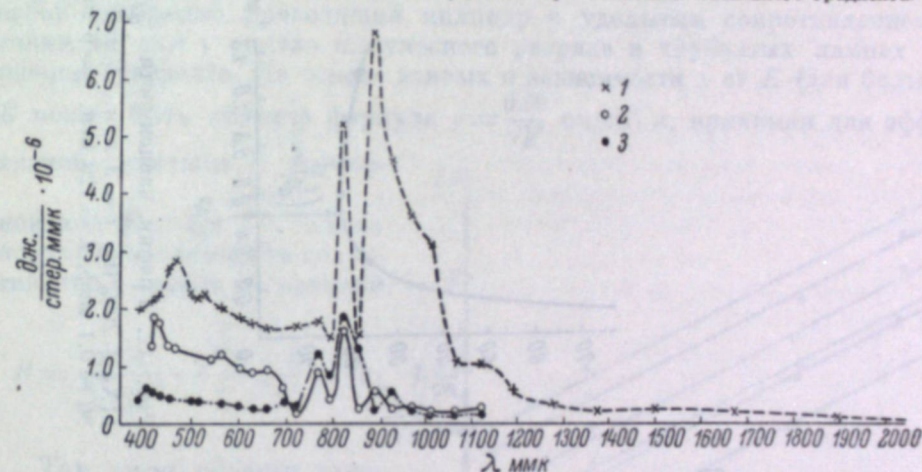


Рис. 9. Спектральные характеристики капиллярных ламп, наполненных ксеноном (1), криптоном (2) и аргоном (3) ($p=600$ мм рт. ст., $d=0.5$ мм, $l=70$ мм, $C=0.25$ мкф, $U=1.2$ кв).

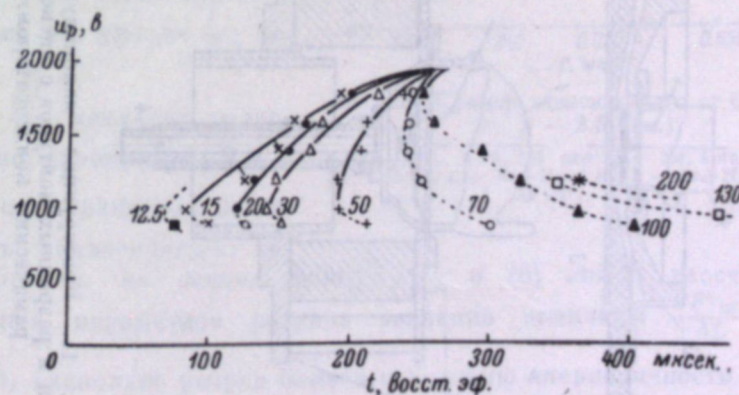


Рис. 10. Графики восстановления пробивной прочности газового промежутка капиллярных ламп (кварц, $d=0.5$ мм, $l=70$ мм, ксенон, $p=600$ мм рт. ст.) при рассеиваемых в них мощностях от 12.5 до 200 вт.

Пунктирные ветви кривых — области $t_{\text{восст}}$, зависящих на соответствующие длительности разрядов.

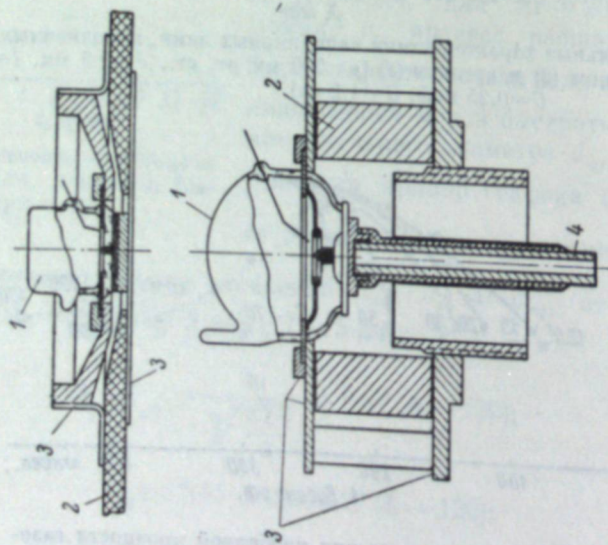


Рис. 11. Конструкция малоиндуктивных ламп и разрядных контуров с дисковым конденсатором.
1 — лампа; 2 — конденсатор; 3 — контактные пластины; 4 — балластное сопротивление.

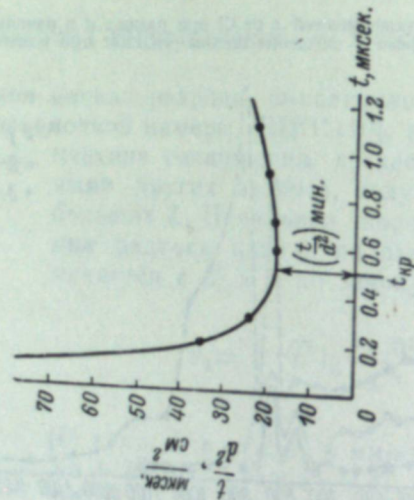


Рис. 12. График зависимости $\frac{t}{d^2}$ от t ($\text{Xe} + 20\% \text{H}_2$, $p = 3$ атм., $U = 7$ кв, $C = 0.1$ мкф, $L = 120$ нгн, $l = 6$ мм).

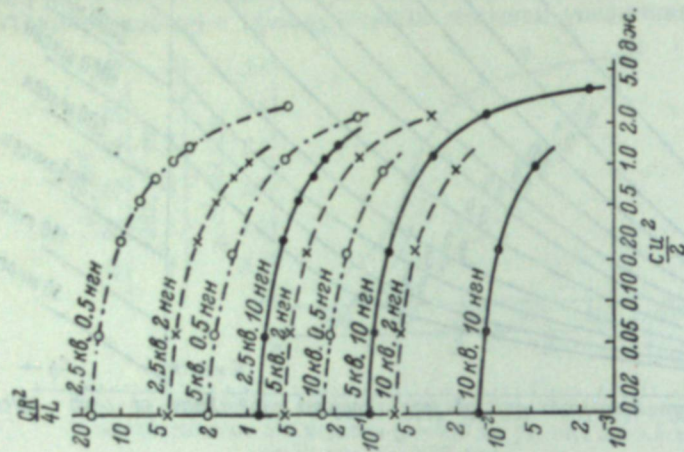


Рис. 13. Зависимость величины $\frac{CR^2_{\min}}{4L}$ от энергии вспышки при различных U_0 и L ($\text{Xe} + 20\% \text{H}_2$, $p = 3$ атм., $l = 6$ мм).

Осциллографическое изучение электрического импульса при различных параметрах разряда показало, что эффективное сопротивление канала (измеренное по затуханию колебаний) меняется с диаметром канала d и электрическим градиентом в нем так, как если бы канал представлял

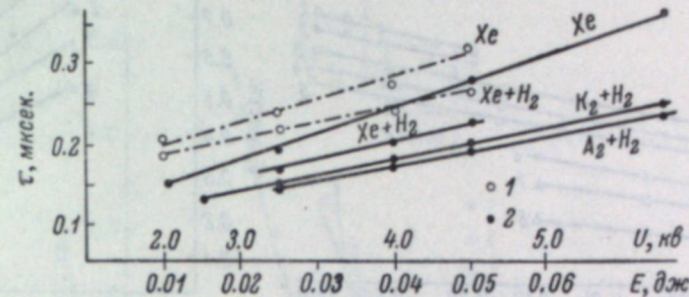


Рис. 14. Пример зависимости τ от квадрата напряжения ($C = 0.005$ мкф, $l = 6$ мм, $L = 10$ нгн).

1 (штрих-пунктир) — давление 0.9 атм.; 2 (сплошная линия) — давление 2.5 атм.

собой однородно проводящий цилиндр с удельным сопротивлением ρ , таким же как у канала импульсного разряда в трубчатых лампах при равном градиенте. На основе данных о зависимости ρ от E (для больших E может быть принята формула $\rho = \frac{0.09}{\sqrt{E}}$ ом/см) и, принимая для эффек-

тивной величины E временной ход $E = E_0 e^{-\frac{R}{2L}t}$, можно получить зависимость сопротивления канала от времени

$$R = \frac{0.09l}{\pi \sqrt{E_0}} \cdot \frac{e^{\frac{R}{4L}t}}{t} \left(\frac{t}{d^2} \right). \quad (6)$$

Так как в области изменения t от $\frac{L}{2R}$ до $\frac{4L}{R}$, соответствующей длительности импульса на уровне $\frac{1}{12}$, ве-

личина $\frac{Rl}{e^{\frac{R}{4L}t}}$ меняется незначительно, зависимости $R_{\min}$ и $\left(\frac{t}{d^2} \right)_{\min}$ от параметров долж-

ны быть аналогичными. Таким образом, на основе формул (3) и (6) можно рассчитать для различных параметров разряда значения величины $\frac{CR^2_{\min}}{4L}$, опреде-

ляющей, насколько разряд близок к условию аperiodичности $\left(\frac{CR^2_{\min}}{4L} \geq 1 \right)$. Соответствующие графики приведены на рис. 13. Эти графики, в соответствии с прямыми экспериментальными наблюдениями, показывают, что неограниченный разряд без балластного сопротивления

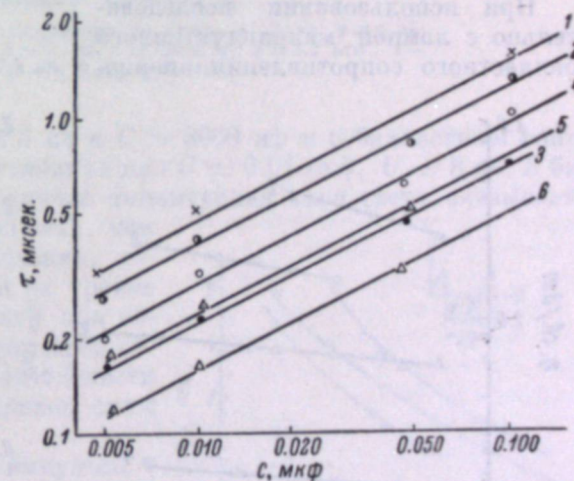


Рис. 15. Пример зависимости τ от C ($l = 6$ мм, $p = 2.5$ атм.).

1 — $\text{Xe} + \text{H}_2$, 4 кв, 150 нгн; 2 — Xe , 4 кв, 10 нгн; 3 — Xe , 2.45 кв; 4 — $\text{Xe} + \text{H}_2$, 4 кв; 5 — $\text{Ar} + \text{H}_2$, 4 кв; 6 — $\text{Ar} + \text{H}_2$, 2.45 кв.

может быть аperiodическим при энергии вспышки до 0.5 дж, индуктивности до 6 нгн и напряжении питания до 2.5 кв. Быстрее всего

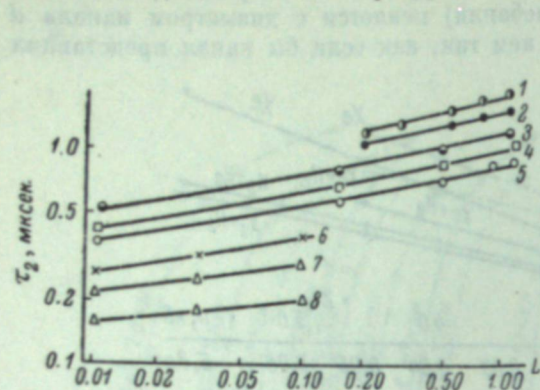


Рис. 16. Пример зависимости τ от L ($l = 6$ мм, $p = 2.5$ атм.).

1 — Хе, 0.1 мкф, 0.2 дж; 2 — Хе, 0.01 мкф, 0.2 дж; 3 — Хе+Н₂, 0.01 мкф, 0.2 дж; 4 — Хе+Н₂, 0.01 мкф, 0.2 дж; 5 — Хе+Н₂, 0.01 мкф, 0.1 дж; 6 — Хе+Н₂, 0.005 мкф, 0.08 дж; 7 — Хе+Н₂, 0.005 мкф, 0.05 дж; 8 — Хе+Н₂, 0.005 мкф, 0.02 дж.

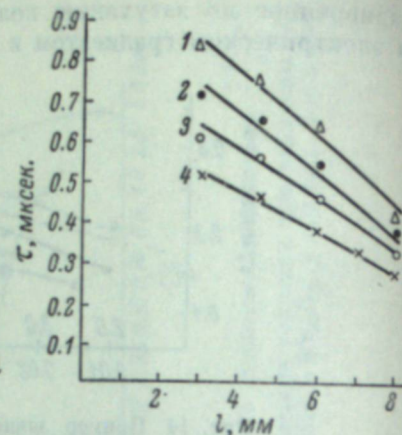


Рис. 17. Пример зависимости τ от l (ксенон, $p = 3$ атм., $C = 0.01$ мкф, $L = 200$ нгн).

1 — 0.1 дж, 4.5 кв; 2 — 0.075 дж, 3.87 кв; 3 — 0.05 дж, 3.16 кв; 4 — 0.025 дж, 2.24 кв.

величина $\frac{CR^2_{\min}}{4L}$ снижается с увеличением напряжения. При $U = 5$ кв для обеспечения аperiodичности L должно быть ниже 1 нгн.

При использовании последовательно с лампой малоиндуктивного балластного сопротивления аperiodического разряда может быть получен, если

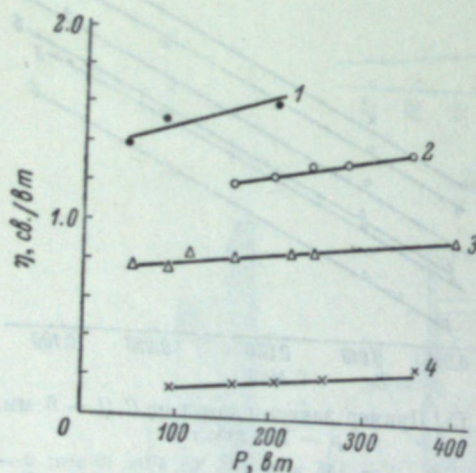


Рис. 18. Зависимости световой отдачи разряда от средней рассеиваемой в лампе мощности ($p = 3$ атм., $l = 6$ мм, $L = 120$ нгн) при различных частотах вспышек f .

1 — Хе, 0.04 мкф, 400 гц; 2 — Хе+Н₂, 0.04 мкф, 400 гц; 3 — Хе+Н₂, 0.05 мкф, 800 гц; 4 — Хе+Н₂, 0.015 мкф, 2200 гц.

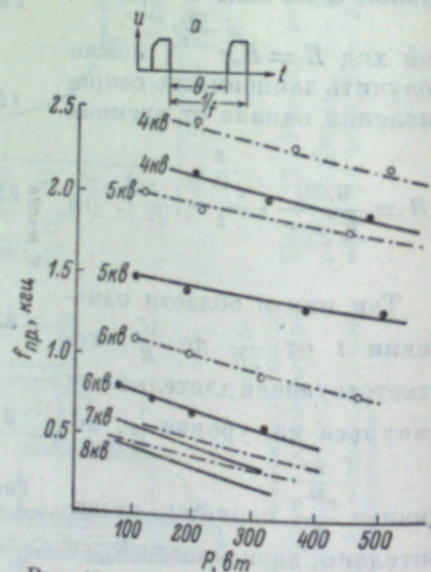


Рис. 19. Зависимость $f_{\text{пр}}$ от P при разных паузах заряда θ в схеме с управляющим триодом (Хе + 20% Н₂).

а — ход изменения напряжения на лампе. Сплошная линия — $\theta = 50\%$ $\frac{1}{f}$, штрих-пунктир — $\theta = 75\%$ $\frac{1}{f}$.

Электрический и световой импульсы длительностью соответственно ≈ 0.05 мксек. и 0.1 мксек. на уровне 35% максимума могут быть получены без балластного сопротивления в Хе+20% Н₂ при $p \approx 3$ атм.,

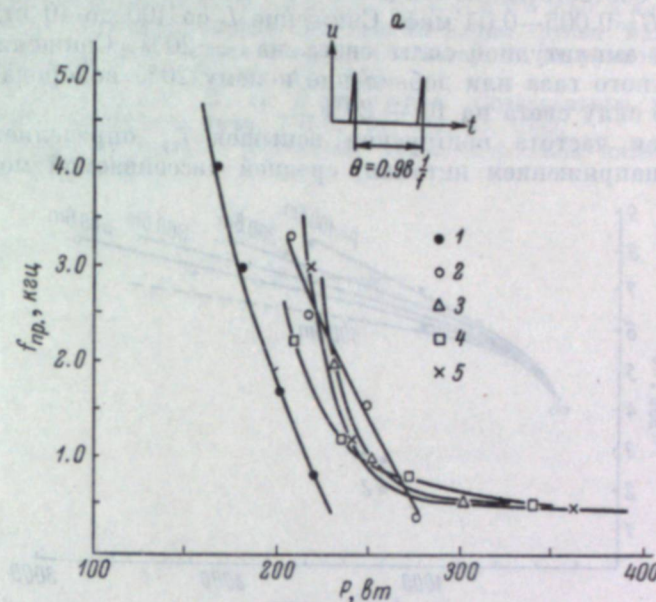


Рис. 20. Зависимость $f_{\text{пр}}$ от P в схеме с «прокидывающим плечом» [12].

а — ход изменения напряжения на лампе. 1 — 5 кв; 2 — 6 кв; 3 — 7 кв; 4 — 8 кв; 5 — 9 кв. Газ Хе+Н₂, $p = 3.2$ атм., $l = 5.5$ мм, $\Phi_{\text{шара}} = 65$ мм.

$l \approx 5$ мм, $L \approx 10$ нгн, $U \approx 3$ кв и $C \approx 3000$ пф и с балластным сопротивлением в тех же прочих условиях при $C \approx 0.01$ мкф, $U \approx 8$ кв, R балласта ≈ 1.2 ом. Во втором случае амплитудная сила света оказывается приблизительно на 40% большей, чем в первом. Длительность вспышки, измеренная по кривой яркости на уровне 35% ее амплитудного значения, для исследованного диапазона параметров составляет около половины длительности вспышки, измеренной по кривой силы света.

Длительность светового импульса τ при разряде в шаровой импульсной лампе без балластного сопротивления возрастает пропорционально квадрату напряжения на конденсаторе, корню, квадратному из его емкости и корню шестой степени из индуктивности разрядного контура (рис. 14—16). Она уменьшается с увеличением длины искрового промежутка (рис. 17), а также с увеличением давления газа и уменьшением его атомного номера. При наличии балластного сопротивления влияние на τ всех названных факторов, кроме рода газа, ослабевает, а род газа влияет так же, как без балласта.

Световая отдача разряда в шаровых лампах слабо меняется при изменении напряжения и емкости питающего конденсатора (рис. 18). Ампли-

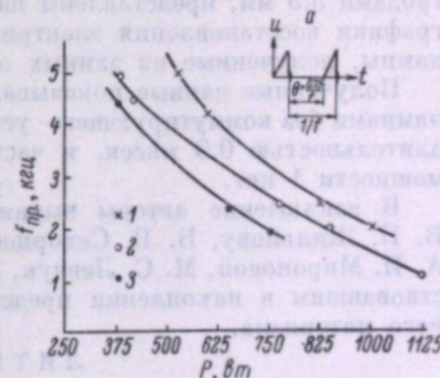


Рис. 21. Зависимость $f_{\text{пр}}$ от P в схеме с вакуумным управляющим триодом ($U = 6.5$ кв).

а — ход изменения напряжения на лампе. 1 — Хе+Н₂; 2 — Хе+Н₂; 3 — Хе+Н₂.

дический разряд может быть получен, если

$$\sqrt{\frac{L}{C}} < R_{\text{балласта}} < 1.4 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

(для энергий в интервале 0.01 ÷ 5 дж).

тудная сила света, отнесенная к единице энергии, при увеличении $\frac{CU_2}{2}$ от 0.05 до 0.8 дж снижается с $2.5 \cdot 10^6$ св./дж (ксенон) и $1.2 \cdot 10^6$ (аргон с 20% H_2) до соответственно 0.8 и $0.6 \cdot 10^6$ св./дж. при $p=3$ атм., $l=6$ мм, $L=120$ нгн, $G=0.005-0.04$ мкф. Снижение L со 100 до 10 нгн приводит к увеличению амплитудной силы света на $\approx 20\%$. Снижение атомного номера инертного газа или добавление к нему 20% водорода уменьшает амплитудную силу света на $10 \div 20\%$.

Предельная частота повторения вспышек $f_{пр}$ определяется схемой включения, напряжением питания, средней рассеиваемой мощностью P

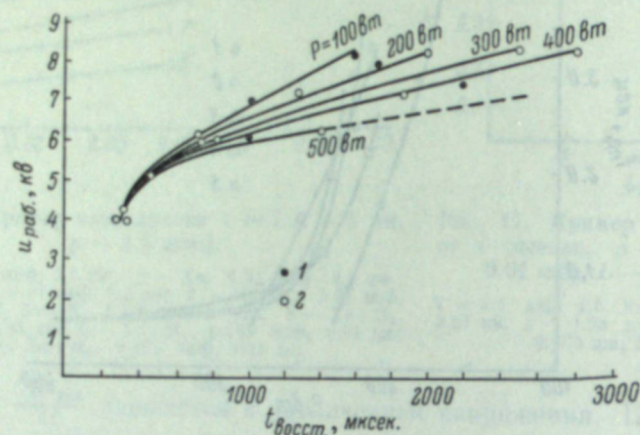


Рис. 22. Зависимости времени восстановления пробивной прочности лампы от рабочего напряжения при разных мощностях.

1 — $\theta = 50\%$; 2 — $\theta = 75\%$.

и конструктивными данными лампы (наполнение, электроды). Примеры зависимости $f_{пр}$ от P для трех схем, полученных для шаровых ламп с диаметром баллона 65 мм, давлением газа 3.2 атм. и расстоянием между электродами 5.5 мм, представлены на рис. 19—21. На рис. 22 представлены графики восстановления электрической прочности газового промежутка лампы, полученные из данных о предельной частоте вспышек.

Полученные данные показывают возможность получения с шаровыми лампами без коммутирующего устройства в разрядном контуре вспышек длительностью 0.3 мксек. и частотой 5 кГц при средней рассеиваемой мощности 1 кВт.

В заключение авторы выражают благодарность В. И. Васильеву, В. П. Жильцову, Б. В. Скворцову, Р. Г. Вдовченко, В. Ф. Разумцеву, А. И. Мироновой, М. С. Левчук, М. И. Эпштейну и С. А. Якубович, участвовавшим в накоплении представленного обширного экспериментального материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Маршак. Трубочатые газоразрядные лампы конденсированного искрового газового разряда. Сб. матер. по вакуумной технике, Госэнергоиздат, М., вып. 7, стр. 3, 1955.
2. I. S. Marshak. Some physical and technical aspects of gas discharges in flash tubes. Proc. of 3^d Internat. Congress on high-speed photography. London, Butterworth, p. 30, 1957.
3. И. С. Маршак. К. п. д. трубочатых импульсных ламп. Светотехника, № 1, стр. 17, 1957.
4. И. С. Маршак. Электрические характеристики трубочатых импульсных ламп. Светотехника, № 6, стр. 22, 1957.
5. В. И. Васильев, И. С. Маршак. Пределы нагрузки трубочатых импульсных ламп. Сб. матер. по вакуумной технике, Госэнергоиздат, М., вып. 14, стр. 19, 1958.

6. I. S. Marshak. Blitzlichtröhren für Kurzzeitphotographie. Доклад на 4-м Международном конгрессе по высокоскоростной фотографии, Кельн, 1957.
7. И. С. Маршак, В. И. Васильев, А. И. Миронова, В. П. Иванов, Р. Г. Вдовченко. Новые импульсные лампы. УНФ, VI, 43, 1959.
8. Р. Г. Вдовченко, И. С. Маршак, С. А. Никольская. Зависимость светотдачи трубочатых импульсных ламп от длины трубки, материала катода и величины приэлектродных объемов. Сб. матер. по вакуумной технике, Госэнергоиздат, М., вып. 21, стр. 17, 1959.
9. Б. М. Водоватов, М. И. Эпштейн. Спектральные характеристики трубочатых импульсных ламп. УНФ, VI, стр. 35, 1959.
10. О. Ф. Гребенников. Растровый метод скоростной киносъемки. УНФ VI, стр. 145, 1959.

Л. Н. БЫХОВСКАЯ, И. Ш. ЛИБИН,
Ф. А. ЧАРНАЯ

АЗОТНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАМПЫ

В настоящее время можно считать установленным, что яркость импульсного разряда в режиме насыщения возрастает с уменьшением атомного веса газа; это объясняется тем, что непрозрачность, обуславливающая насыщение яркости, наступает в легких газах при более высоких температурах, чем в тяжелых [1—5]. Получение высокой яркости в легких газах возможно поэтому лишь при увеличении плотности энергии в разряде, что затрудняется большой скоростью расширения канала в этих газах. Таким образом, для создания в легких газах условий, обеспечивающих насыщение яркости, требуется значительно повысить скорость поступления энергии в канал разряда. Выполнение этого требования наталкивается на ряд практических трудностей, не позволивших до настоящего времени создать отпаянные импульсные лампы с яркостью выше, чем у аргоновых. Высокая яркость искрового разряда в гелии была получена, как известно [4, 5], в специальных разборных камерах, представляющих собой сложную лабораторную установку.

Исследования, проведенные в работах [1—3], показали, что при разряде в азоте, при давлении около 2 атм., амплитудное значение спектральной плотности лучистой яркости $B_{\lambda \max}$ в области ближнего инфракрасного излучения по абсолютной величине выше, чем в лампах, наполненных тяжелыми инертными газами. Однако в области видимого спектра $B_{\lambda \max}$ азотных ламп, наполненных до 2 атм., оставалось ниже, чем у аргоновых ламп. Это изменение в отношении $B_{\lambda \max}$ азотных и аргоновых импульсных ламп объясняется тем, что в азотных лампах в области инфракрасного излучения был достигнут режим насыщения яркости; в области же видимого спектра режим насыщения в данном разрядном контуре еще не достигался.

Так как повышение давления газа облегчает достижение режима насыщения [1, 2, 6] и, кроме того, позволяет ввести в канал разряда большую энергию, вследствие повышения пробивной прочности разрядного промежутка, целесообразно было провести исследование яркости азотных импульсных ламп более высокого давления.

Изготовление отпаянных импульсных ламп, наполненных азотом, до давления порядка 10 атм. и более наталкивается на ряд практических трудностей, связанных с отпайкой ламп от установки, когда давление в лампе выше атмосферного. Способ охлаждения в жидком азоте, обычно применяемый для наполнения ламп высокого давления тяжелыми инертными газами, позволяет в случае азотных ламп достичь давления не более 3 атм. В настоящих исследованиях для наполнения и запайки ламп использовался метод, предложенный в работе [7].

Исследование максимальной мгновенной яркости производилось осциллографическим методом с использованием импульсного фотометра УИФ-1 ВНИСИ [8]. Перед катодом фотоумножителя, служащего приемником излучения, помещался светофильтр, коррегирующий кривую спектральной чувствительности приемника под кривую относительной видности, что позволило получить результаты в световых единицах.

Чтобы определить, достигает ли для данной лампы режим насыщения максимальной яркости, снимались серии осциллограмм изменения яркости во времени при последовательно увеличивающемся напряжении на конденсаторе. При каждом напряжении снималось не менее 50 осциллограмм, что позволило уверенно определить максимальную амплитуду, соответствующую каждому напряжению. Зависимости максимальной мгновенной яркости от напряжения на конденсаторе для азотных ламп различного давления представлены на рис. 1.

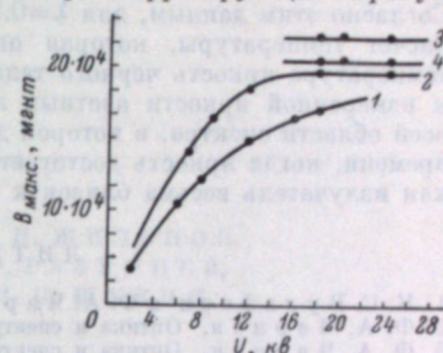


Рис. 1. Зависимость максимальной яркости азотных импульсных ламп от напряжения на конденсаторе (1 — 3 мм, $C = 0.2$ мкф, $L = 0.5$ мкгн).

Давление: 1 — 2.5 атм.; 2 — 7; 3 — 9; 4 — 14 атм.

Как видно из рис. 1, при давлении азота более 6 атм. в применявшемся разрядном контуре ($L = 0.5$ мкгн, $C = 0.2$ мкф) при $U = 12$ кВ достигается насыщение максимальной яркости. Сравнение кривых 1 и 2 этого рисунка показывает, что увеличение давления газа в лампе позволяет существенно понизить напряжение, при котором достигается данное амплитудное значение яркости. Так, яркость в $16 \cdot 10^4$ Мнт в лампах с давлением азота 2.5 атм. достигается при $U = 17$ кВ; это же значение яркости в лампах с давлением 7 атм. достигается при $U = 9$ кВ.

Полученные данные показывают, что в области давлений до 15 атм. максимальная яркость азотных ламп, работающих в режиме насыщения, от давления практически не зависит; увеличение давления вызывает лишь увеличение длительности излучения (рис. 2).

Таким образом, влияние давления, расстояния между электродами (l) и индуктивности разрядного контура на величину напряжения, при котором достигается насыщение яркости, носит тот же характер, что и в инертных газах [1, 2, 9].

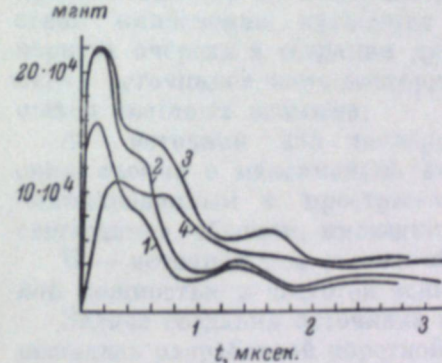


Рис. 2. Кривые изменения яркости ламп во времени (1 — 3 мм, $C = 0.2$ мкф, $L = 0.5$ мкгн).

Азот: 1 — 2.5 атм.; 2 — 7; 3 — 14 атм.
Ксенон: 4 — 8 атм.

Абсолютная величина яркости азотных ламп в режиме насыщения достигает $22 \cdot 10^4$ Мнт, что более чем в 2 раза превосходит яркость ксеноновых ламп. При этом длительность импульса излучения азотной лампы значительно меньше и фронт нарастания его круче (рис. 2).

В соответствии с характерной формой импульса излучения азотных ламп их применение целесообразно в тех случаях, когда требуется точный источник света с высоким амплитудным значением яркости при короткой длительности излучения, например в проекционных системах, используемых для сверхскоростной фотографии, или в точных оптических системах, создающих сильные световые поля в узких углах.

В заключение следует отметить, что измеренное значение максимальной мгновенной яркости азотных ламп, работающих в режиме насыщения, хорошо совпадает с расчетным значением яркости, полученным по данным спектральных измерений в инфракрасной области спектра [1, 2]. Согласно этим данным, для $\lambda=0.9$ мк был проведен по формуле Планка расчет температуры, которая оказалась равной $44\,000^\circ\text{K}$. При этой температуре яркость черного тела составляет $20 \cdot 10^4$ Мнт, т. е. близка к измеренной яркости азотных ламп. Это еще раз показывает, что во всей области спектра, в которой достигнут режим насыщения, в моменты времени, когда яркость достигает наибольшего значения, канал разряда как излучатель весьма близок к черному телу.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. С. Вульфсон и Ф. А. Чарная, УНФ, VI, 27, 1957.
2. Ф. А. Чарная, Оптика и спектроскопия, 4, 6, 1958.
3. Ф. А. Чарная, Оптика и спектроскопия, 1, 7, 1956.
4. H. Fischer, J. O. S. A., 47, 11, 1957.
5. H. Fischer, Conference on extremely high temperatures. Boston, 1958.
6. К. С. Вульфсон, И. Ш. Либин, Ф. А. Чарная, Изв. АН СССР, сер. физ., 19, 61, 1955.
7. И. Ш. Либин, ПТЭ, № 4, 1959.
8. И. М. Гуревич, УНФ, VI, 68, 1957.
9. М. П. Ванюков, А. А. Мак, Н. В. Паразинская, Оптика и спектроскопия, 1, 5, 1956.

В. П. КИРСАНОВ, В. П. ЖИЛЬЦОВ,
И. С. МАРШАК, В. Ф. РАЗУМЦЕВ,
Е. Х. СЛУЦКИН, Л. П. ЩУКИН

НОВЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАМПЫ С ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ ПОВТОРЕНИЯ ВСПЫШЕК

В прежних публикациях, описывавших работу запаянных импульсных ламп в режиме часто повторяющихся вспышек [1—3], рассматривались лампы, разрабатывавшиеся не для целей высокоскоростной киносъемки. В настоящее время промышленностью проведены некоторые разработки ламп, предназначенных специально для этих целей. Данное сообщение посвящено краткому описанию конструкций и эксплуатационных параметров этих ламп. При выборе направлений названных разработок предполагалось, что высокоскоростная киносъемка нуждается в первую очередь в создании двух видов источников часто повторяющихся световых вспышек:

А — источник для тепловых съемок с максимально стабилизированным в пространстве светящимся объемом, имеющим форму короткого нитевидного отрезка;

Б — источник для съемки объектов в отраженном свете с максимальной мощностью и частотой вспышек.

Задача создания источника первого вида наиболее удовлетворительно решалась разработкой короткой капиллярной лампы. Эскиз такой лампы, получившей наименование ИСП-5, показан на рис. 1. Из-за сравнительно низкого предела средней мощности, которую способен рассеять узкий капилляр, решение второй задачи следовало искать в разработке ламп с большим шаровым баллоном и коротким разрядным промежутком между расположенными внутри этого баллона электродами.

Внешние виды серийной импульсной лампы ИСП-300 и полученных в работе лабораторных образцов показаны на рис. 2 и 3 (см. вклейку, стр. 112).

Необходимость обеспечения коммутации повторяющихся сильноточных разрядов на максимально высоких частотах, на которых газовые промежутки импульсных ламп обоих видов не успевают деионизоваться и не могут сами служить коммутирующим элементом, потребовала создания, помимо названных ламп, еще и быстро деионизирующегося многокамерного водородного разрядника, внешний вид которого показан на рис. 4 (см. вклейку, стр. 112). В основу данного разрядника был положен примененный Фрюнгелем [4] принцип пробоя большого числа последо-

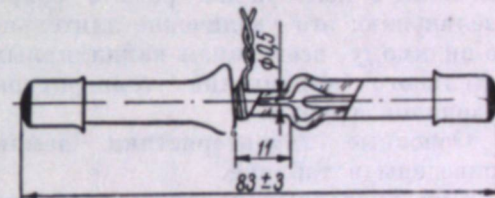


Рис. 1. Эскиз импульсной лампы ИСП-5.

вательных газовых промежутков между близко расположенными изолированными друг от друга металлическими пластинами. Однако в отличие от громоздкого и неудобного в эксплуатации разборного разрядника Фрюнгеля вновь разработанный разрядник был выполнен запаянным и в значительно меньших габаритах.

Капиллярная лампа ИСП-5

Лампа представляет собой кварцевую разрядную капиллярную трубку с расширениями на концах, в которых располагаются цилиндрические, закругленные на концах, вольфрамовые электроды. Внутренний диаметр капилляра — 0,5 мм, его длина 11 мм. Трубка наполнена ксеноном при давлении 500 мм рт. ст. Вследствие сравнительно малой величины приэлектродных пространств плотность газа в разрядном промежутке при большой частоте повторения вспышек не сильно отличается от его плотности при одиночных вспышках. Благодаря этому световые характеристики одиночных и часто повторяющихся разрядов с одинаковыми параметрами питания различаются незначительно. Продолжительность светового импульса все же увеличивается с увеличением частоты разрядов и уже на частотах 2—5 кгц превышает продолжительность одиночной вспышки в полтора-два раза с сохранением тенденции к дальнейшему увеличению; это увеличение длительности светового импульса присуще, по-видимому, всем типам капиллярных ламп и является следствием значительного увеличения температуры разрядной трубки.

Основные характеристики лампы приведены в таблице.

При указанных параметрах разряд контура с капиллярной лампой носит колебательный характер с очень быстрым затуханием, при этом амплитуда тока не превышает нескольких сот ампер. В этих условиях оказалось возможным использовать в качестве коммутатора разрядного контура водородный тиратрон ТГИ1-325/16, который, пропуская только одну положительную полуволну тока, укорачивает возбуждающий импульс через лампу. Эта схема включения представлена на рис. 5, а указанная для нее в таблице частота вспышек импульсной лампы не является предельной и может быть значительно увеличена при соответствующем выборе режима.

Еще большие частоты следования вспышек можно получить при коммутации разрядного контура капиллярного строботрона показанным на рис. 4 многокамерным водородным разрядником. В этом случае имеет место колебательный разряд контура, что несколько увеличивает длительность импульса и энергию, выделяющуюся в лампе за каждую вспышку. Предельная частота вспышек в контуре с водородным разрядником определяется в основном не лампой, а схемой включения и качеством разрядника и может быть доведена до нескольких десятков килогерц.

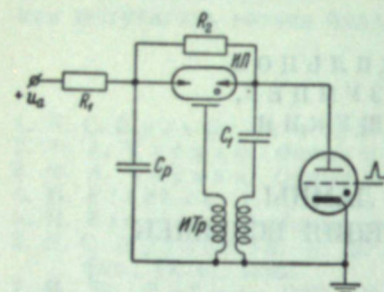


Рис. 5. Схема включения капиллярной лампы последовательно с тиратроном.

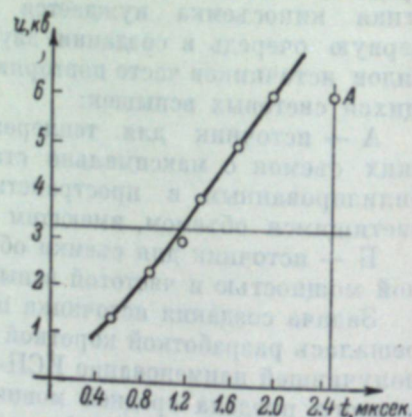


Рис. 6. Кривая восстановления пробивной прочности лампы ИСП-300 в режиме 400 гц, 300 вт.

Наименование	Единицы измерения	ИСП-5		ИСП-300		Лабораторные образцы с диаметром баллона 63 мм	
		режим I	режим II	режим «а»	режим «б»	режим I	режим II
Рабочее напряжение.	кв	10	10	6,3	7	5—7	5—7
Емкость питающего конденсатора.	мкф	0,002	0,01	0,035	0,2	0,04—0,08	0,2—0,5
Энергия одного разряда.	дж	0,1	0,5	0,75	5	1	5
Частота вспышек.	кгц	2	10 *	0,4	2	15	2
Средняя мощность.	квт	0,2	5	0,3	10	15	10
Длительность непрерывной работы.	сек.	1	0,1 *	5 час.	0,5	0,01	2
Индуктивность разрядного контура.	нги	1500	1500	—	150	100	100
Эффективное сопротивление искрового промежутка лампы.	ом	—	2	—	—	—	—
Амплитуда импульсного тока.	ка	0,1—0,2	0,4	—	—	До 7	До 10
Максимальная габаритная яркость.	мгнт	20	70	50	—	—	190
Амплитуда силы света.	мгсв.	0,08	0,5	0,3	—	0,8	25
Длительность светового импульса.	мксек.	0,4	0,65	2	—	1,2	2
Крутизна переднего фронта светового импульса.	св./сек.	$0,8 - 1,0 \times 10^{12}$	$1,5 \times 10^{12}$	—	—	5×10^{12}	—
Коммутатор разрядного контура.	тип	Тиратрон.		Нет.		Разрядник.	

Примечание. Звездочкой отмечены режимы питания с водородным разрядником в разрядном контуре.

При выборе режима работы лампы ИСП-5 необходимо учитывать, чтобы суммарная энергия, рассеянная в лампе на протяжении любой серии вспышек, не превышала определенной величины — ориентировочно 200—500 джоулей.

Шаровые лампы

Особенностью конструкции новой шаровой лампы ИСП-300 является коаксиальное расположение вводов, обеспечивающее малоиндуктивное соединение электродов с соответствующим конденсатором. Баллон лампы диаметром 80 мм наполнен смесью газов ксенона и азота при общем давлении около 3 атм. Благодаря добавке азота к ксенону достигается некоторое уменьшение длительности вспышки и увеличение крутизны переднего фронта импульса света.

Основные характеристики лампы для двух типовых режимов питания приведены в таблице.

При работе лампы в стробоскопическом режиме во избежание перехода в непрерывное горение необходимо обеспечивать соответствующую коммутацию напряжения на ее электродах. На рис. 6 приведен график восстановления электрической прочности лампы ИСП-300 после очередного разряда при средней мощности 300—400 вт в установившемся тепловом режиме. Нормальная работа лампы возможна, если нарастание напряжения на ее электродах происходит медленнее восстановления пробивной

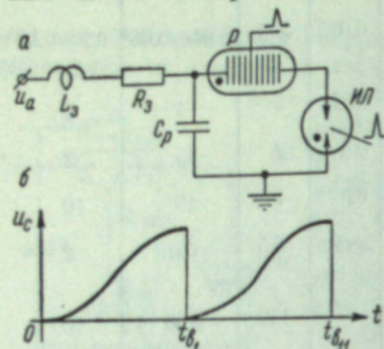


Рис. 7. Простейшая схема включения импульсных ламп с коммутацией разрядного контура разрядником (а) и график напряжения на рабочем конденсаторе (б).

прочности. Электрические схемы с коммутацией зарядной цепи лампы описаны в [2].

Включение в разрядный контур многокамерного водородного разрядника (рис. 7) позволяет использовать лампу в течение коротких серий вспышек в форсированных режимах по мощности и частоте. Примером может служить следующий режим работы: при средней мощности 10 кВт и частоте 2 кгц лампа может работать в течение 0.5 сек. Увеличение длительности серии больше 0.5 сек. приводит к взрыву лампы.

Как было выяснено, причиной взрыва является не столько перегрев лампы во время серии, сколько сильная вибрация и большое давление наполняющего газа,

поэтому в ходе работы были изготовлены лабораторные образцы ламп, отличающиеся от ламп ИСП-300 главным образом более низким давлением газа и более вибростойкой конструкцией.

Обследование этих образцов показало, что режим работы шаровых ламп с большими частотой и средней мощностью обладает следующими особенностями:

1) Значительное уменьшение во время работы плотности газа в искровом промежутке по сравнению с плотностью при одиночной вспышке приводит к снижению силы света, сопротивления канала и электрической прочности промежутка.

2) При частоте вспышек выше 15 кгц резко ухудшается стабильность положения канала разряда.

3) Для обеспечения надежной работы лампы к ее конструкции предъявляются повышенные требования в отношении прочности.

Исследование зависимости амплитуды силы света I_a от частоты повторения вспышек производилось на лабораторных образцах ламп, внешний вид которых представлен на рис. 3. Результаты исследования иллюстрируются рис. 8, из которого

видно, что отношение амплитуды $\frac{I_{a2}}{I_{a1}}$ силы света второй вспышки к первой ¹ при частоте 15 кгц для ламп диаметром 63 мм снижается в 3—5 раз. Из этого же графика видно, что снижение амплитуды

¹ Амплитуда силы света последующих вспышек мало отличается от соответствующей амплитуды второй вспышки.

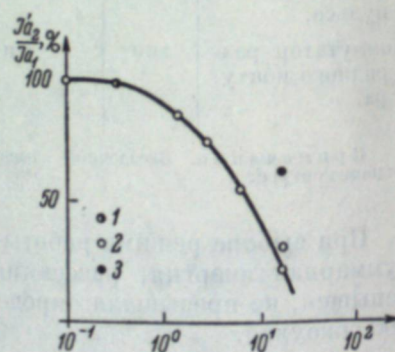


Рис. 8. График снижения амплитуды силы света импульсных ламп на частоте.

1 — Xe + N₂, p=0.9 атм., диаметр баллона 63 мм, W=1 дж, L=150 мкг; 2 — то же, но диаметр баллона 26 мм; 3 — Xe, p=0.8 атм., диаметр баллона 3 мм, W=1 дж, L=200 мкг.

К ст. В. П. Кирсанова и др.,
стр. 109.

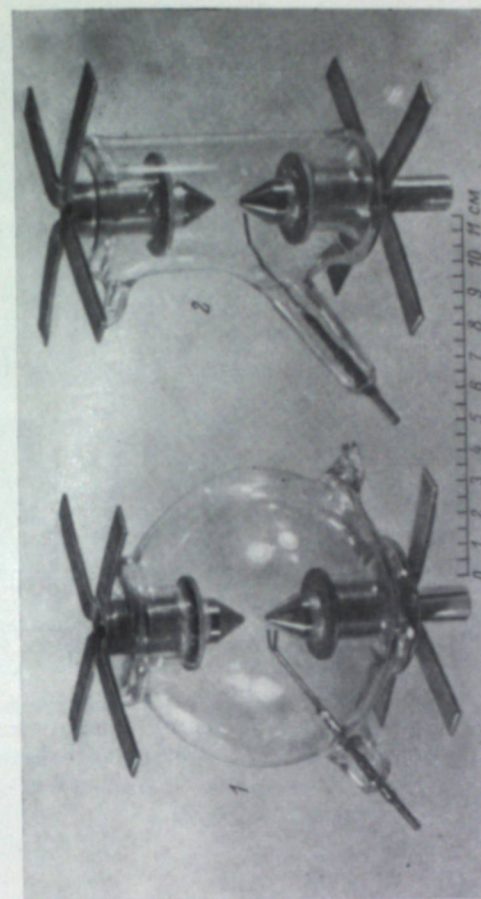


Рис. 3. Лабораторные образцы импульсных ламп с диаметром баллона 63 (1) и 26 мм (2).

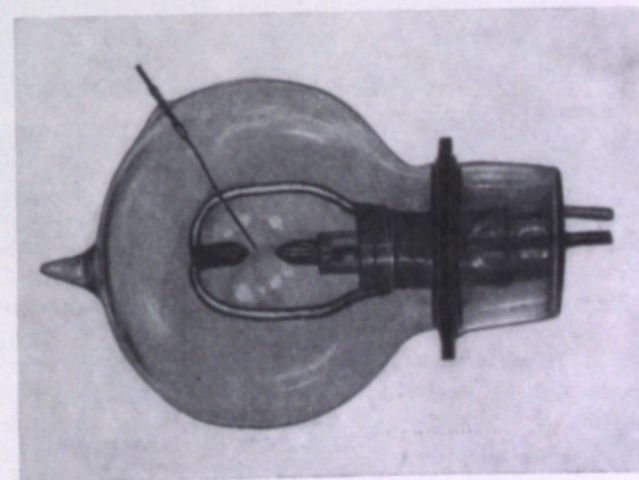


Рис. 2. Внешний вид лампы ИСП-300.



Рис. 4. Многокамерный водородный разрядник.

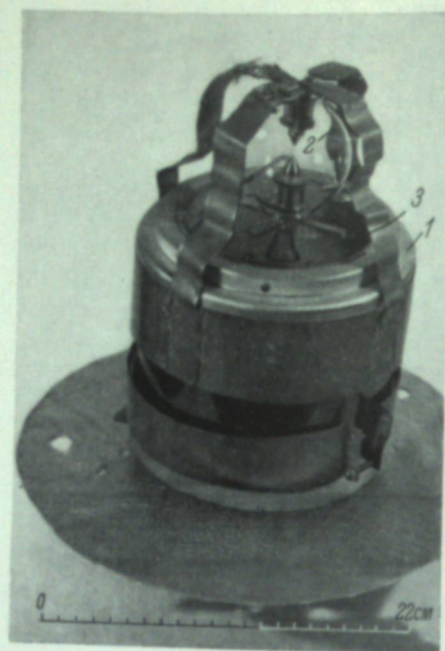


Рис. 9. Внешний вид разрядного контура.
1 — лампа; 2 — разрядник; 3 — конденсатор.

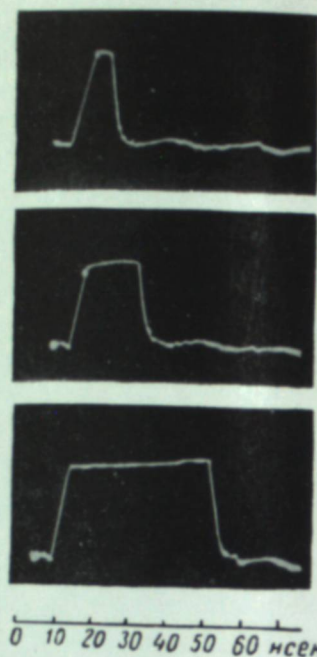


Рис. 3. Осциллограмма импульсов при различной длине срезающего промежутка.

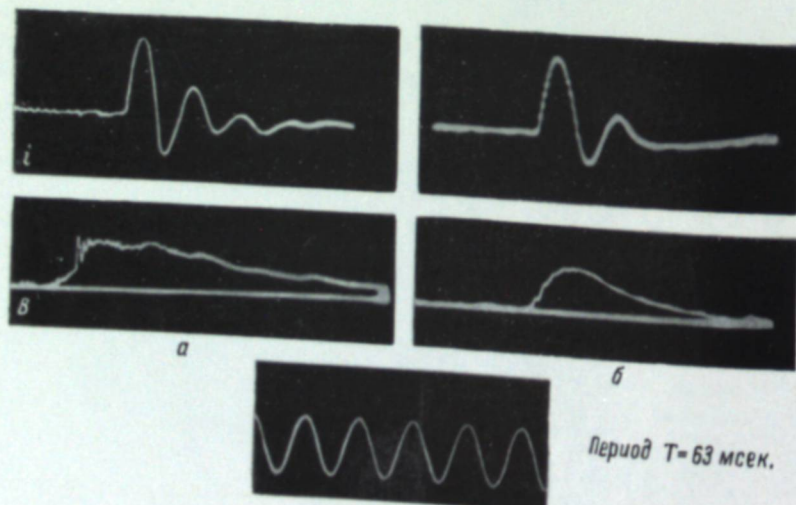


Рис. 2. Изменения во времени силы тока (i) и яркости (B) вспышки, наблюдаемые при наличии в разрядном промежутке системы металлических пластин (b) и без нее (a) (частота градуировочной синусоиды 16 мГц).

Условия разряда: аргон, давление $p=2$ атм., $C=6000$ пф, $L=15$ нгн, $U_0=11.2$ кв, $W=0.38$ дж, $l=4.7$ мм, число пластин $n=8$.

туды силы света для ламп диаметром 26 мм несколько меньше, а для капиллярных ламп оно составляет не более 40%. Амплитудная яркость снижается с ростом частоты аналогичным образом.

Из-за колебательного характера разряда в лампах шарового типа параметры разрядного контура (U , C , L) в слабой степени влияют на величины длительности вспышки τ , амплитуды силы света I и яркости B .

Исследование зависимостей величин I , B и τ от рода и давления наполняющего лампы газа показало, что наиболее эффективным средством улучшения характеристик ламп для скоростной фотографии, требующей снижения τ и увеличения I , является применение смесей тяжелых инертных газов с легкими. Так, например, смесь 5 частей ксенона с 2 частями азота позволяет получить при низком давлении $p \approx 1$ атм., энергии 5 дж и напряжении только 5 кв амплитудную яркость, близкую к 200 мкгт. Это в 2 раза больше, чем насыщенная яркость для чистого ксенона, получаемая при том же давлении. Для получения такой же яркости в аргоне требуется повысить давление до величины порядка 4 атм., при которой прочность лампы сильно снижается. Амплитуда силы света указанной смеси больше, чем у чистых инертных газов, на 20—50%, а длительность вспышки приблизительно в полтора раза меньше.

Созданные лабораторные образцы шаровых ламп (рис. 3) позволяют осуществлять работу в двух типовых режимах с характеристиками, указанными в таблице.

Конструкция ламп в совокупности со специальным конденсатором позволяет обеспечить малую индуктивность разрядного контура, содержащего многокамерный водородный разрядник ($L \approx 100$ нгн; индуктивность разрядного контура, примененного Фрюнгелем [4] при примерно таких же параметрах питания лампы, составляет около 300 нгн). Это снижение достигается за счет минимальной длины вводов при одновременно большем их диаметре, а также наиболее рациональным взаимным расположением лампы, разрядника и конденсатора (рис. 9; см. вклейку, стр. 113).

Водородный разрядник

Разрядник представляет собой стеклянный цилиндр диаметром 65 мм и длиной 180 мм, на торцах которого впаяны основные токоведущие электроды. На боковой поверхности цилиндра по образующей впаяны три слаботочных электрода, через которые осуществляется поджиг искровых промежутков (в некоторых образцах имеется только один ввод для поджига). Внутри разрядника основные электроды соединяются с пакетом алюминиевых дисков (25 шт.) таким образом, что прохождение тока через разрядник возможно только при пробое всех 24 искровых промежутков. Расстояния между дисками выдерживаются в пределах от 0.1 до 0.2 мм. Разрядник наполняется очищенным водородом до давления ~ 1 атм. Вес разрядника 550 г.

Напряжение самопробоя разрядника равно примерно 10 кв, рабочее напряжение в контуре с импульсной лампой 5—7 кв. Его работа проверялась в контурах с энергией каждого разряда 1—5 дж, при этом по нагреву допускается, чтобы энергия каждой серии импульсов не превышала 40 кдж.

Восстановление пробивной прочности разрядника после очередной вспышки происходит примерно по экспоненциальному закону с постоянной времени τ . Эта постоянная времени определяется многими факторами, из которых главным является энергия каждого разряда. Существенное влияние на постоянную времени оказывают также форма и амплитуда импульса тока, прошедшего через разрядник. Так, например, при работе с шаровыми импульсными лампами при напряжении в контуре 7 кв и

энергии вспышки 1 дж амплитуда затухающих колебаний тока составляет несколько тысяч ампер, а постоянная τ равна в этом случае ≈ 7 —10 мксек. При использовании в разрядном контуре капиллярной лампы и той же энергии вспышки амплитуда аperiodического импульса тока уменьшается почти в 10 раз, соответственно уменьшается и τ .

Осциллограммы световых импульсов шаровой лампы в контуре без разрядника и с разрядником при прочих равных условиях показали, что амплитуда силы света уменьшается за счет разрядника лишь на 10—20%, но вместе с тем значительно, почти вдвое, уменьшается длительность импульса за счет ускорения спада заднего фронта в схеме с разрядником. Это объясняется тем, что в начальный момент прохождения тока при больших его значениях сопротивление разрядника значительно меньше, чем лампы, а к концу вспышки относительная величина сопротивления разрядника становится больше, чем лампы, и он забирает большую часть энергии. Кроме того, разрядник разрывает ток в контуре уже при амплитуде затухающих колебаний в несколько сот ампер.

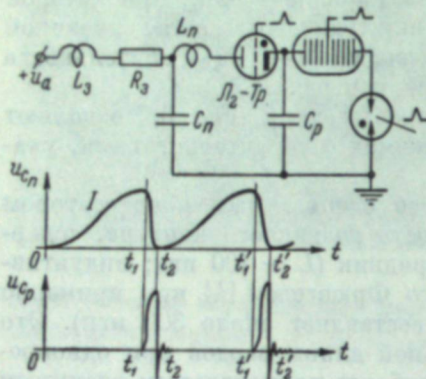


Рис. 10. Схема включения импульсных ламп с промежуточным емкостным накопителем.

отсутствует в течение почти всего интервала между вспышками, что исключает возможность спонтанного пробоя искровых промежутков. Схема работает следующим образом: за одну-три микросекунды до вспышки подается импульс, поджигающий тиратрон Λ_2 , и происходит перезарядка промежуточного накопителя — конденсатора C_n на рабочий конденсатор C_p через тиратрон и дроссель L_n . К моменту окончания перезарядки подается поджигающий импульс на лампу и разрядник, конденсатор C_p разряжается. Графики напряжения на конденсаторах C_n и C_p представлены на рис. 10.

Эта схема была опробована как с шаровыми, так и с капиллярными лампами при применении в разрядном контуре разрядника и без него. Схема может быть использована для питания импульсных стробоскопических ламп почти во всех случаях и особенно тогда, когда необходимо получить предельно высокие частоты и мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Маршак, Л. И. Щукин, Настоящий сборник, стр. 93.
2. И. С. Маршак, В. П. Жильцов, Л. И. Щукин, Светотехника, №№ 11, 13, 1961.
3. М. П. Ванюков, В. И. Исаенко, Светотехника, № 3, 7, 1960.
4. F. Grün gel and W. Thor wart, Program of the 5-th International Congress on High-Speed Photography, 1960.
5. В. П. Жильцов, Авт. свид. № 152040.

М. П. ВАНЮКОВ, А. А. МАК

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКОЙ ЯРКОСТИ

С целью определения предельных яркостей импульсных источников света проведено исследование яркости канала искрового разряда в атмосфере гелия, аргона, азота и воздуха при больших скоростях нарастания тока в разряде. Для этого был разработан разрядный контур на основе малоиндукционного цилиндрического конденсатора со следующими параметрами: емкость конденсатора $C=0.1$ —1.0 мкф, индуктивность $L=4$ —8 нгн, напряжение $U \approx 2$ —10 кв, длина искрового промежутка $l \approx 1.5$ мм. Предельная скорость нарастания тока в разряде могла составлять $1.2 \cdot 10^{12}$ а/сек., давление газа в камере могло изменяться от 1 до 40 атм.

Измерения спектральной плотности яркости канала разряда проводилось по сплошному и линейчатому излучению в области длин волн 4000—9000 Å [1, 2]. Во всех обследованных газах удалось добиться предельной

Газ	Режим			$T_a, ^\circ K$	$B, \text{Мвт} \cdot 10^8$
	$p, \text{атм.}$	$U/L, \text{а/сек.}$	$C, \text{мкф}$		
Гелий	31	10^{12}	0.2	70000	37
Азот	3	$1.1 \cdot 10^{12}$	0.1	62000	32
Аргон	3	$0.3 \cdot 10^{12}$	0.2	46000	22
Воздух	1	$0.8 \cdot 10^{12}$	0.1	38000	17

яркости. Путем измерения в торец канала и в направлении, перпендикулярном его оси, а также по спектральному распределению излучения установлено, что канал разряда в предельных режимах непрозрачен и излучает, как абсолютно черное тело с температурой, равной температуре канала.

Значения предельных яркостей B и яркостных температур T_a и соответствующие им режимы разряда приведены в таблице.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. П. Ванюков, А. А. Мак и Н. В. Паразинская, Оптика и спектроскопия, 1, 642, 1956.
2. М. П. Ванюков, А. А. Мак, ДАН СССР, 123, 1022, 1958.

М. П. ВАНЮКОВ, В. И. ИСАЕНКО,
В. В. ЛЮБИМОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ТЕЛА СВЕЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ, РАБОТАЮЩИХ В РЕЖИМЕ ПОВТОРНЫХ ВСПЫШЕК

Введение

В настоящее время искровые импульсные лампы высокого давления широко применяются в искровой фотографии, в частности для теневых съемок и съемок в узконаправленном световом пучке. В этом случае приходится учитывать то обстоятельство, что тело свечения лампы не постоянно во времени, а непрерывно изменяется и что канал от разряда к разряду меняет свое положение в пространстве. В последнее время в литературе описаны некоторые конструкции ламп, обеспечивающие повышенную стабильность тела свечения в пространстве [1, 2]. В настоящем сообщении приводятся результаты измерений, характеризующие пространственное распределение каналов импульсной лампы при ее работе с частотой 400 гц. Описаны также некоторые методы стабилизации искрового канала.

Измерительная установка

Для измерений использовалась фотоэлектрическая методика. Канал искрового разряда импульсной лампы проектировался объективом O на плоскость щели фотоэлектронного умножителя Φ_1 (рис. 1). Ширина щели имела размеры в $10 \div 15$ раз меньшие, чем диаметр изображения канала искры в момент полного его развития. Щель располагалась параллельно оси изображения канала и могла перемещаться поперек изображения канала. Одновременно свет от импульсной лампы попадал на второй фотоумножитель Φ_2 , который регистрировал изменение во времени силы света вспышки. Сигналы с обоих фотоумножителей подавались на схему совпадений импульсов и в дальнейшем регистрировались измерителем скорости счета. В том случае, если ось искрового канала не совпадала точно со щелью фотоумножителя, канал заполнял щель с некоторой задержкой времени, определяемой скоростью расширения границы канала. Положение изображения искрового канала в плоскости щели определяется тем точнее, чем выше временное разрешение схемы совпадений. В наших измерениях временное разрешение можно было доводить до 10^{-8} сек. Вероятностное распределение положения проекций искрового

канала на заданную плоскость (т. е. на плоскость щели) можно получить, если в процессе работы импульсной лампы постепенно перемещать щель

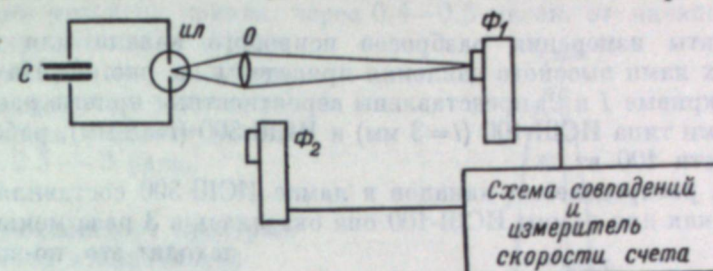


Рис. 1. Принципиальная схема установки для измерения пространственного распределения каналов импульсной лампы, работающей в режиме повторных включений.

ИЛ — импульсная лампа; C — конденсатор разрядного контура; O — объектив; Φ_1 и Φ_2 — фотоумножители.

в направлении, перпендикулярном оси канала, и производить запись отсчетов измерителя скорости счета импульсов.

Пространственное распределение искровых каналов импульсных ламп

На графике рис. 2 представлено вероятностное распределение центров искрового канала для разряда в атмосфере воздуха. Электроды изготавливались из вольфрама и затачивались в виде полусфер. Длина искрового промежутка 3 мм, мощность, рассеиваемая в разряде, — 300 вт.

Искровой промежуток включался последовательно с дополнительным управляющим промежутком, имеющим длину до 3 мм. По оси абсцисс откладывалось расстояние от оси наиболее вероятного нахождения каналов разряда, по оси ординат — относительное распределение положений центров канала. Ширина распределения центров канала, измеренная на уровне, соответствующем половине максимального значения функции распределения, для этого случая составила $\Delta x = 1$ мм. При тех же условиях разряда регистрировалось распределение каналов для различной конфигурации электродов. На графиках рис. 3 показано распределение при работе с электродами, имеющими конусообразную форму, а также форму усеченного конуса с различными площадками сечения. Из графиков видно, что разброс в положении каналов увеличивается по мере расширения площадки усеченного конуса от 0.35 мм, для конусообразных электродов до 1.7 мм, для электродов, имеющих форму усеченного конуса, с площадкой диаметром 2 мм.

Приведенные выше данные позволяют сделать вывод, что для повышения стабильности положения каналов следует затачивать на конус, если допустим небольшой срок службы лампы. В то же время, если требуется длительная работа импульсной лампы, то желательно

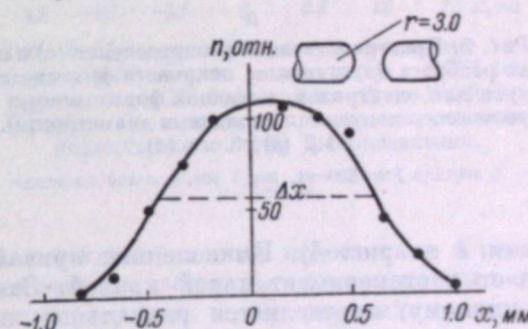


Рис. 2. Пространственное распределение каналов искрового разряда в воздухе. Электроды имеют форму полусфер.

Длина искрового промежутка $l=3$ мм; мощность, потребляемая промежутком $P=300$ вт; частота следования вспышек $f=400$ гц; x — расстояние от наиболее вероятного местоположения канала.

применять электроды, заточенные на усеченный конус с небольшой площадью диаметром не более 1 мм, или электроды, заточенные в виде полусфер.

Результаты измерения разбросов искрового канала для шаровых импульсных ламп высокого давления приведены на рис. 4. На верхних графиках (кривые 1 и 2) представлены вероятностные кривые распределения для ламп типа ИСП-100 ($l=3$ мм) и ИСП-500 ($l=8$ мм), работающих при мощности 100 Вт.

Ширина распределения каналов в лампе ИСП-500 составила 1.5 мм, в то время как для лампы ИСП-100 она оказалась в 3 раза меньше. Про-

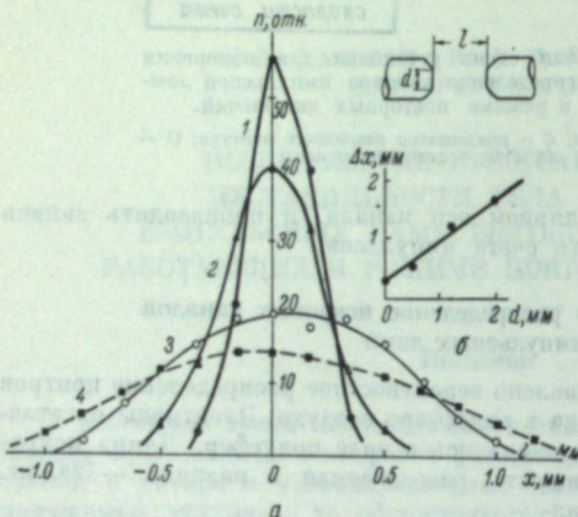


Рис. 3. Пространственное распределение (а) и ширина разброса (б) каналов искрового разряда в воздухе для электродов, имеющих форму конуса (1) и усеченного конуса с площадками диаметром: 0.5 (2), 1.2 (3), 3 мм (4).

$P = 300$ Вт, $l = 3$ мм, $f = 400$ Гц.

исходит это, по-видимому, вследствие того, что в лампе ИСП-100 значительно меньшее расстояние между электродами и электроды имеют меньший радиус кривизны. Следует отметить, что лампа ИСП-100 в приведенном режиме может работать сравнительно непродолжительное время (5–15 мин.). На этом же графике (кривая 3) приведено распределение положения искровых каналов для лампы типа ИСП-300, работающей при мощности 300 Вт. Ширина распределения в этом случае составила $\Delta x = 1.5$ мм. Для этого случая проведено сравнение распределения каналов с кривой нормального закона распределения ошибок (пунктирная кривая 4 на рис. 4). Вычисленная кривая Гаусса достаточно точно совпадает с экспериментальной кривой. Закон распределения каналов, по-видимому, определяется радиальным понижением градиента плотности газа к оси симметрии кривой распределения.

В таблице даны диаметры искрового канала и соответствующие им яркости в центре канала (в относительных единицах) для различных моментов времени. Энергия вспышки лампы ИСП-300 составляла 0.75 Дж, что соответствовало энергии, приходящейся на каждую вспышку при работе лампы в режиме повторных включений. Изменение во времени канала разряда регистрировалось с помощью пространственно-временной развертки канала на экране электронно-оптического преобразователя. Диаметр канала измерялся на уровне, соответствующем половине максимального значения яркости.

Время от начала развития разряда, мксек.	0.03	0.08	0.15	0.25	0.4
Диаметр искрового канала, мм	0.21	0.43	0.65	0.9	1.28
Яркость B в центре искрового канала, отн. ед.	1	0.95	0.8	0.56	0.42

Данные, приведенные в таблице, показывают, что ширина разброса местоположения искрового канала по своему значению в $2 \div 5$ раз пре-

вышает его диаметр в течение интервала времени, когда яркость в центре канала имеет значение, близкое к максимальному ($B > 0.7 B_{\max}$). При дальнейшем развитии канала, через 0.4–0.5 мксек. от начала разряда, его диаметр достигает величины, равной ширине распределения, но при этом яркость канала в центре успевает уменьшиться в $2.5 \div 3$ раза.

Способы повышения пространственной стабильности искровых каналов

Нами было поставлено несколько опытов по улучшению пространственной стабильности искровых каналов. Обычно при включении искрового промежутка с дополнительным поджигающим электродом канал имеет изогнутую форму с отклонением в сторону включающего электрода (рис. 1). В процессе работы вспомогательный электрод обгорает, что в конечном счете приводит к смещению положения канала в сторону на $2 \div 4$ мм и соответственно увеличивает разброс каналов. Например, при работе в воздухе на частоте 400 Гц (рис. 5, а), при мощности 300 Вт (6 кВ, 0.04 мкФ) электрод обгорает за 2 часа на 3 мм, в результате чего дальнейшая работа импульсной лампы становится невозможной. Для устранения этих недостатков в разрядник были введены два поджигающих электрода, располагаемых в одной плоскости с основными электродами (рис. 5, б), перпендикулярно к оси основных электродов, но с различных сторон от оси. Высоковольтный импульс подается на оба вспомогательных электрода. Искровой разряд в этом случае едва касается обоих вспомогательных электродов и имеет два характерных изгиба. При таком расположении электродов обгорание вспомогательных электродов почти незаметно, тем более что электроды могут быть изготовлены из сравнительно толстого вольфрамового прутка. В качестве примера можно указать, что такой искровой промежуток работал в течение 2 час. без заметных изменений, в положении канала разряда. Нами проводились опыты по исследованию устойчивости канала при различных частотах повторения разрядов. Практически положение канала остается постоянным при частотах порядка $2 \div 3$ кГц. Выше этих частот управляемость и стабиль-

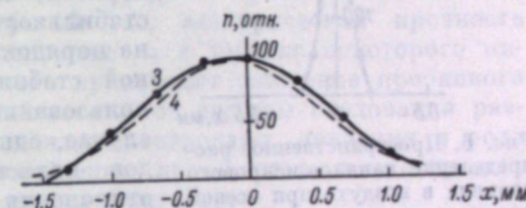
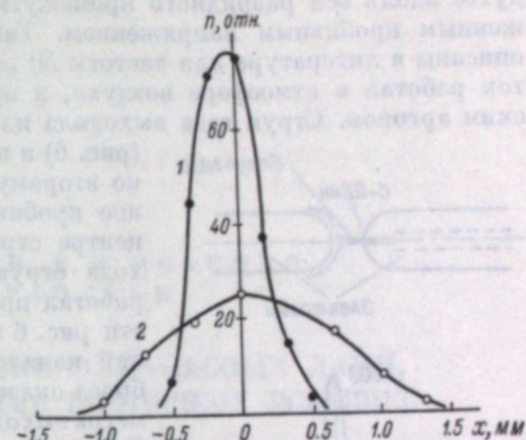


Рис. 4. Пространственное распределение каналов импульсных ламп типов ИСП-100 (кривая 1), ИСП-500 (кривая 2) и ИСП-300 (кривая 3), кривая 4 вычислена согласно нормальному закону распределения.

Кривые 1, 2 сняты при $P=100$ Вт, кривая 3 — $P=300$ Вт.

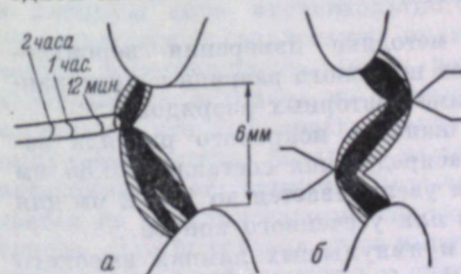


Рис. 5. Расположение электродов при включении искрового промежутка с одним (а) и двумя (б) поджигающими электродами.

такой искровой промежуток работал в течение 2 час. без заметных изменений, в положении канала разряда. Нами проводились опыты по исследованию устойчивости канала при различных частотах повторения разрядов. Практически положение канала остается постоянным при частотах порядка $2 \div 3$ кГц. Выше этих частот управляемость и стабиль-

ность разряда нарушается вследствие наличия движений газа, которые не успевают затухнуть к очередному разряду.

Стабильность искрового промежутка можно повысить, если применить дутье вдоль оси разрядного промежутка струей газа, обладающей пониженным пробивным напряжением. Такие опыты ранее проводились и описаны в литературе для частоты 50 герц [1]. В нашем случае промежуток работал в атмосфере воздуха, а продувка осуществлялась техническим аргоном. Струя газа выходила из отверстия в одном из электродов

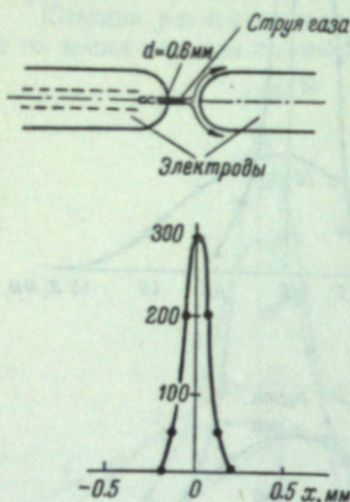


Рис. 6. Пространственное распределение каналов искрового разряда в воздухе при осевой продувке промежутка струей аргона ($P = 400$ Вт, $f = 400$ Гц, $l = 3$ мм).

шей аппаратурой ширину разброса можно было оценить только приблизительно $\div 0.03$ мм. Недостатком этого метода стабилизации является то, что при повышении мощности поверхность быстро разрушается, и при длительном включении канал медленно перемещается из стороны в сторону на величину, равную своему диаметру.

Выводы

1. Разработана фотоэлектрическая методика измерения вероятностного распределения положения каналов искрового разряда в пространстве при включении промежутка в режиме повторных разрядов.
2. Пространственное распределение каналов искрового разряда зависит от формы электродов. Ширина распределения составляет 0.35 мм для электродов конусообразной формы и увеличивается до $1 \div 2$ мм для электродов, имеющих форму полусферы или усеченного конуса.
3. Ширины распределения каналов в импульсных лампах высокого давления типа ИСП лежат в пределах $0.5 \div 1.5$ мм.
4. Описаны способы улучшения пространственной стабильности канала с помощью введения в искровой промежуток двух вспомогательных электродов при продувке промежутка струей газа, обладающего пониженной пробивной способностью, и при использовании поверхностного разряда по керамике.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. P. C. Thackeray, Nature, 180, 913, 1957.
2. N. B. Stevens, J. A. Hart, Пат. США, кл. 313—205, № 2922066.

М. П. ВАНЮКОВ, В. И. ИСАЕНКО,
Г. Н. ТРАВЛЕЕВ

ПРЕДЕЛЬНЫЕ НАГРУЗКИ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП, РАБОТАЮЩИХ В РЕЖИМЕ ПОВТОРНЫХ ВСПЫШЕК

Особенность работы искрового промежутка в режиме повторных разрядов заключается в том, что после очередного пробоя в нем остается частично ионизованный и разогретый газ, электрическая прочность которого восстанавливается не мгновенно, а в течение некоторого интервала времени. В результате этого происходит снижение пробивного напряжения импульсной лампы, зависящее от частоты следования разрядов и их энергии, расстояния между электродами, давления и рода наполняющего газа, условий охлаждения промежутка и электродов, электрической схемы питания и других факторов.

Некоторые данные о восстановлении пробивного напряжения искрового промежутка приводятся в работах [1—5].

Настоящая работа посвящена изучению восстановления пробивной прочности искрового промежутка, работающего в режиме повторных разрядов с предельной нагрузкой при частотах повторения разрядов вплоть до 20 кгц.

Методика исследования

Схема включения представлена на рис. 1. Разрядный контур, составленный из рабочего конденсатора C_1 и импульсной лампы S , включается в анодную цепь высоковольтного импульсного триода типа ГМИ-30 (используется параллельное включение двух триодов). Триод открывается непосредственно перед вспышкой кратковременным импульсом, длительность которого не превышает 7 мксек., что обеспечивает при частоте 15 кгц скважность, равную 10. Таким образом, на электродах импульсной лампы большую часть времени между вспышками разность потенциалов отсутствует. Включающий высоковольтный импульс подается на дополнительный электрод через $1\text{—}2$ мксек. после зажигания триода. Для получения этого импульса применяется разряд конденсатора через водородный тиратрон и обмотку высоковольтного трансформатора. Частота следования вспышек задавалась звуковым генератором типа ЗГ-10. Напряжение на рабочем конденсаторе измерялось с помощью емкостного делителя и осциллографа ИО-4. За предельную мощность, рассеиваемую в импульсной лампе, принималась такая мощность, при которой лампа начинала терять свою управляемость за счет появляющихся самопробоев. Число пробоев считалось специальной электронной схемой, причем фиксировались режимы, при которых число самопробоев составляло 5% от общего числа вспышек, что соответствовало нижнему пределу разброса пробивного напряжения импульсной лампы.

С помощью сдвинутого во времени зондирующего импульса имелась возможность определить электрическую прочность искрового промежутка в различные моменты времени от начала разряда при его работе с заданной частотой повторения.

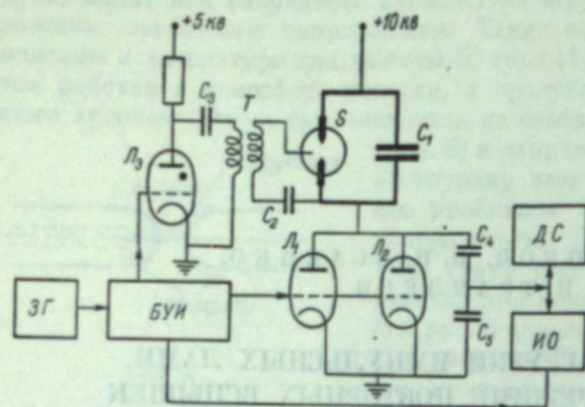


Рис. 1. Электрическая схема установки.

S — исследуемый импульсный источник света; C_1 — рабочий конденсатор 1000–8000 пф, C_2 — 100 пф, C_3 — 1000 пф, C_4 — 20 пф, C_5 — 2000 пф; T — высоковольтный импульсный трансформатор — 20 кВ; L_1 , L_2 — импульсный триод ГМН-30, L_3 — водородный тиратрон ТГН-130/10; ЗГ — звуковой генератор; БУИ — блок управляющих импульсов; ДС — дискриминатор и счетчик пробоев; ИО — импульсный осциллограф ИО-4.

раза, в то время как при более высоких значениях частоты от 2 до 20 кгц напряжение изменяется всего на 20 ÷ 30%. При этом оказывается, что начиная с некоторого значения частоты, которую можно назвать крити-

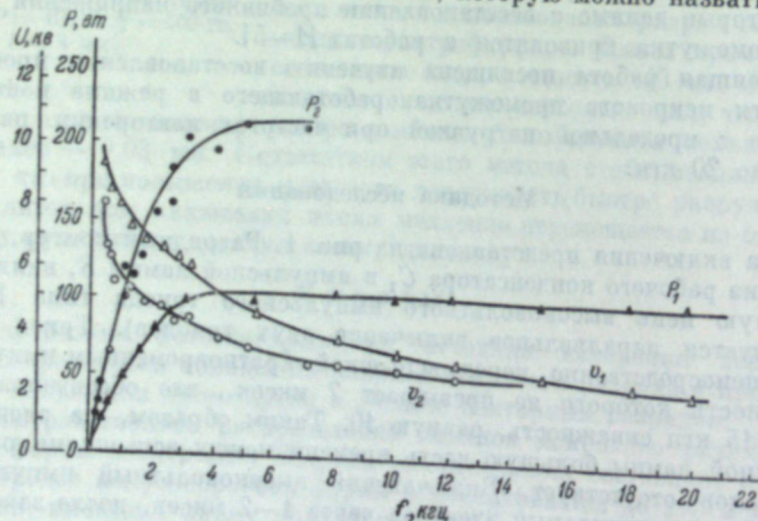


Рис. 2. Зависимость пробивного напряжения U и предельной мощности искрового разряда P в воздухе от частоты повторения вспышек при длине разрядного промежутка $l=3.5$ мм.

U_1, P_1 соответствуют разряду емкости $C_1=2000$ пф, U_2, P_2 — $C_1=8000$ пф.

ческой, предельная мощность, рассеиваемая в искровом промежутке, изменяется незначительно, а иногда она остается практически постоянной. Снижение напряжения в области частот, граничащих с критической частотой, во многих случаях происходит пропорционально частоте [5].

При увеличении емкости рабочего конденсатора в искровом промежутке можно выделить большую мощность, хотя разряд при этом про-

Результаты измерений

Зависимость пробивного напряжения и предельной мощности, рассеиваемой в разрядном промежутке, от частоты повторения вспышек для случая искрового разряда в воздухе при емкости рабочего конденсатора $C_1=2000$ пф и $C_2=8000$ пф и длине искрового промежутка $l=3.5$ мм представлена на рис. 2. С повышением частоты вспышек до 1 ÷ 2 кгц наблюдается быстрое снижение пробивного напряжения примерно в два

исходит при более низком напряжении. На рис. 3 приведены аналогичные зависимости напряжения и предельной мощности от частоты вспышек для искрового промежутка, работающего в аргоне при постоянном давлении 5 атм. В этом случае после достижения критической частоты намечается небольшой спад мощности.

Снижение пробивного напряжения имеет место и в случае разряда в отпаянных лампах, когда общее количество газа остается постоянным в небольшом объеме лампы (рис. 4). Опыты проводились с лампой типа ИСП-500, наполненной ксеноном до давления в 5 атм.

Предельную мощность, рассеиваемую в искровом промежутке, можно повысить, если применить интенсивную продувку искрового промежутка струей свежего газа. В этом случае пробивное напряжение снижается в меньшей степени (рис. 5), что сдвигает критическую частоту в область больших частот (с 2.5 до 10 кгц) и дает возможность увеличить значение предельной мощности примерно в 4 раза.

На этом же графике рис. 5 показано значение усредненного во времени светового потока в относительных единицах. Свет регистрировался с помощью фотоумножителя с сурьмяно-цеиевым фотокатодом. Оказалось, что для случая разряда в воздухе при увеличении частоты разрядов от 4 до 20 кгц происходит снижение усредненной во времени светотдачи на 30 ÷ 40%.

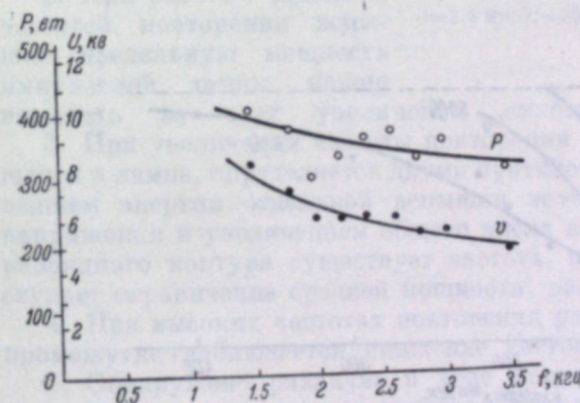


Рис. 3. Зависимость пробивного напряжения U и предельной мощности P искрового разряда в аргоне при постоянном давлении 5 атм. от частоты повторения вспышек.

U_1, P_1 соответствуют разряду емкости $C_1=1000$ пф, U_2, P_2 — $C_1=4000$ пф.

5% от общего числа зондирующих импульсов вызывает пробой искрового промежутка. Следующие кривые приведены для 50 и 90% соответственно.

Таким образом, по верхней и нижней кривой десятки микросекунд имеет пробивное напряжение, которое в первые десятки микросекунд имеет величину 40–50% относительно среднего пробивного напряжения, а в по-

Характер восстановления пробивной прочности искрового промежутка для лампы типа ИСП-500, работающей при нагрузке 180 Вт и частоте 1000 гц, можно видеть на рис. 6. Нижняя кривая соответствует таким значениям пробивного напряжения, при которых только

следующие моменты времени возрастает до 100%. Из кривой видно также, что в первые 50 мксек. электрическая прочность искрового промежутка возрастает медленно, а затем наступает быстрое восстановление пробивной прочности.

На рис. 7 приведены аналогичные кривые для искрового промежутка, работающего в воздухе при частотах 1 и 10 кгц. Здесь пологий участок

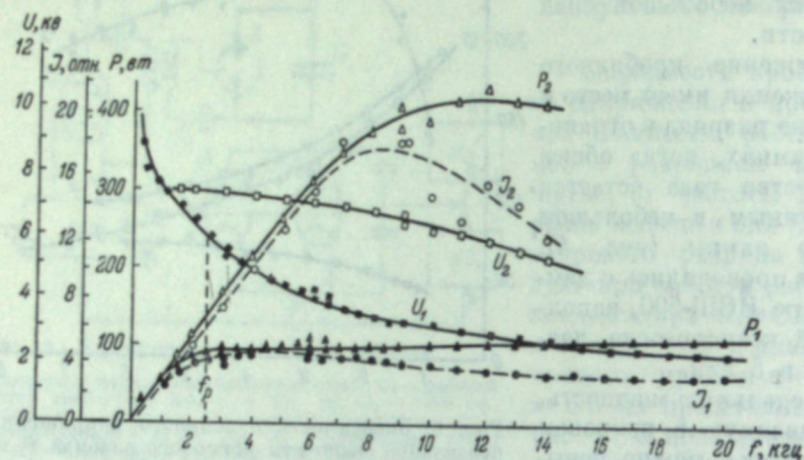


Рис. 5. Влияние продувки на пробивное напряжение U , предельную мощность P и усредненную во времени силу света I искрового разряда в воздухе; $l=3.5$ мм, $C=2000$ пф.

U_1, P_1, I_1 — без применения продувки; U_2, P_2, I_2 — при наличии продувки воздуха.

в начальной части кривой значительно короче и составляет всего 20 мксек. Кроме того, в первые моменты после разряда электрическая прочность искрового промежутка, работающего с большей частотой (10 кгц), вос-

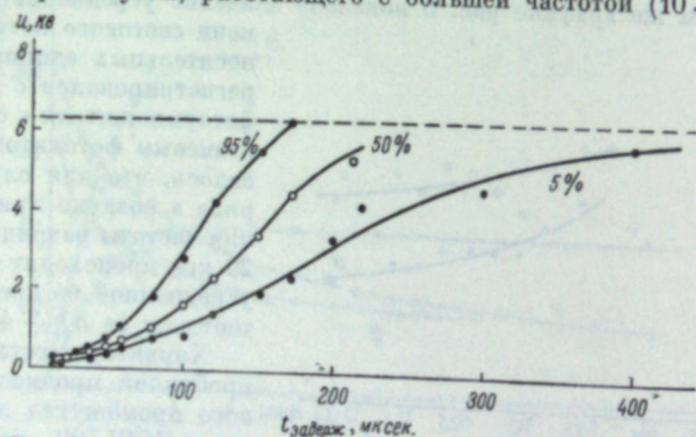


Рис. 6. Восстановление электрической прочности импульсной лампы ИСП-500, характеризующееся различным количеством самопробоев (95, 50 и 5%) от общего числа вспышек. $l=8$ мм, $C=8000$ пф, $P=180$ Вт, $f=1000$ гц.

становляется быстрее, что связано с уменьшением энергии, приходящейся на отдельный разряд.

С целью выяснения влияния тепловых потоков в искровом промежутке на развитие искрового разряда было проведено высокоскоростное фотографирование искрового промежутка с помощью камеры ФП-22.

Рассмотрение снимков показывает, что через 20—30 мксек. после окончания разряда начинается развал оболочки канала искры, после

чего в течение сравнительно длительного времени (1000—2000 мксек.) в разрядном промежутке происходит перемешивание тепловых потоков, которое полностью не завершается к началу следующего разряда. В связи с этим медленное восстановление пробивной прочности в первые моменты после разряда можно приписать наличию невозмущенного столба газа, сохранившего достаточную степень ионизации. Быстрое восстановление прочности в дальнейшем можно связать с началом интенсивного разрушения оболочки канала вследствие конвекционного движения газа.

Снимки искрового промежутка, работающего с интенсивной продувкой газа, показывают, что воздействие продувки начинает сказываться в ранней стадии разрушения оболочки канала примерно через 20 ÷ 30 мксек. после начала разряда.

Выводы

1. Включение искровых импульсных ламп в режиме часто повторяющихся вспышек приводит к значительному снижению их пробивного напряжения, что ограничивает рассеиваемую в лампах среднюю во времени мощность.

2. При работе с заданной частотой повторения вспышек предельную мощность импульсной лампы можно повысить за счет увеличения емкости рабочего конденсатора.

3. При увеличении частоты повторения разрядов мощность, выделяющаяся в лампе, определяется двумя противоположными факторами: уменьшением энергии отдельной вспышки вследствие снижения пробивного напряжения и увеличением общего числа вспышек. Для каждого режима разрядного контура существует частота, после достижения которой наступает ограничение средней мощности, рассеиваемой в лампе.

4. При высоких частотах повторения разрядов в воздушном искровом промежутке наблюдается снижение светоотдачи вспышек.

5. Обнаружено различие в ходе кривых восстановления пробивной прочности для предельных нагрузок импульсных ламп в зависимости от частоты повторения вспышек.

6. Применение интенсивной продувки искрового промежутка позволяет значительно (~ в 4 раза) увеличить мощность, выделяющуюся в промежутке за счет быстрого охлаждения газа и выравнивания его плотности.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Vollrath, Actes du 2-eme Congrès intern. fotogr. et cinématogr. ultra-rapides, Paris, Dunod, 1954.
2. А. В. Рубчинский, Тр. ВЭИ, 63, 54, 1958.
3. С. М. Райский, ЖТФ, 10, 459, 1940.
4. Т. Е. Broadbent and J. K. Wood, Brit. J. Appl. Phys., 6, 368, 1955.
5. М. П. Ванюков и В. И. Исаенко, Светотехника, № 3, 7, 1960.

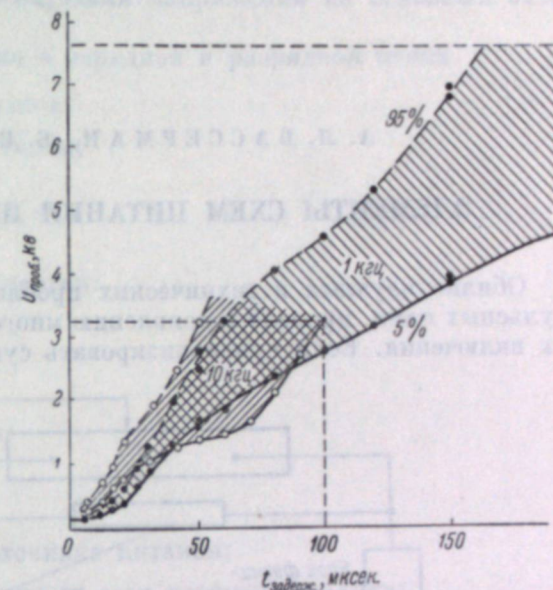


Рис. 7. Восстановление электрической прочности искрового промежутка в воздухе, характеризующееся различным количеством самопробоев (95 и 5%) от общего числа вспышек для частот повторений 1 и 10 кгц.

$l=3.5$ мм; $C=2000$ пф; $f_1=1$ кгц, $P_1=60$ Вт; $f_2=10$ кгц, $P_2=120$ Вт.

А. Л. ВАССЕРМАН, Б. В. СКВОРЦОВ

ЭЛЕМЕНТЫ СХЕМ ПИТАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП

Обилие научных и технических проблем, решаемых с помощью импульсных ламп, привело к появлению многообразных электрических схем их включения. Если проанализировать существующие схемы, то можно

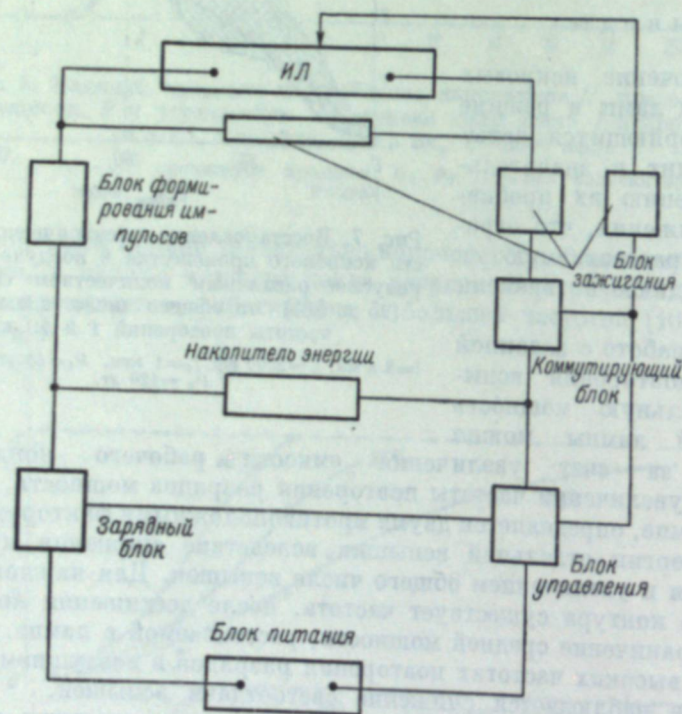


Рис. 1. Блок-схема питания и включения импульсной лампы.

найти в них много сходных элементов, каждый из которых может быть отображен соответствующим узлом принципиальной блок-схемы питания импульсных ламп, которая изображена на рис. 1. По этой блок-схеме можно произвести следующую классификацию элементов схемы.

1. По зажиганию:

- а) внешнее зажигание (осуществляется подачей высоковольтного импульса на внешний электрод лампы);
- б) последовательное зажигание (осуществляется элементом, включенным последовательно в цепь импульсной лампы);

- в) параллельное зажигание (осуществляется элементом, подключенным параллельно лампе);
- г) смешанное зажигание;
- д) дежурная дуга.

2. По коммутации:

- а) в зарядной цепи (коммутация зарядного тока);
- б) в разрядной цепи (коммутация напряжения на основных электродах лампы);
- в) совместная коммутация в зарядной и разрядной цепях.

3. По формированию импульса:

- а) с помощью длинной линии;
- б) трансформатора;
- в) дросселя;
- г) конденсатора.

4. По типу накопителя энергии:

- а) емкостные;
- б) индуктивные;
- в) длинные линии.

5. По типу зарядной цепи:

- а) реактивная;
- б) активная.

6. По типу первичного источника питания:

- а) питание непосредственно от сети переменного тока;
- б) питание от машинных преобразователей;
- в) питание от аккумуляторных батарей;
- г) питание от выпрямителя.

На рис. 2 и 3 приведены схемы зажигания и коммутации в соответствии с данной классификацией. Приведенная классификация является приближенной, но позволяет разграничить функции тех или иных элементов, что очень важно при составлении технического задания на разработку схемы. При разработке схемы для ограниченного применения вопросы экономичности схемы, габаритов, стоимости отходят на второй план, но когда разрабатываемая установка предназначена для широкого использования, то этими вопросами пренебрегать нельзя. Это можно иллюстрировать на примере разработки схемы питания строботрона ИСП-10, основными требованиями к которой были надежность и компактность (рис. 4). Известно, что в режиме часто повторяющихся вспышек лампы при определенной частоте могут войти в режим постоянного горения. Для обеспечения нормальной работы необходимо снять напряжение с электродов импульсной лампы сразу же после очередной вспышки. Это осуществляется с помощью специальных схем с коммутацией в зарядной или в разрядной цепях.

Коммутация в зарядной цепи может быть осуществлена тиратроном, электронной лампой или дросселем, а в разрядной цепи — управляемым водородным разрядником или тиратроном. Так как требуемая частота вспышек строботрона ИСП-10 относительно низкая, то применение схем с электронными и ионными коммутирующими элементами является нецелесообразным из-за их громоздкости и сложности управления. Наиболее очевидным казалось применение дросселя, но такой дроссель должен обладать определенной вольтамперной характеристикой, что достигается применением дорогостоящих пластин из пермаллоя. Кроме того,

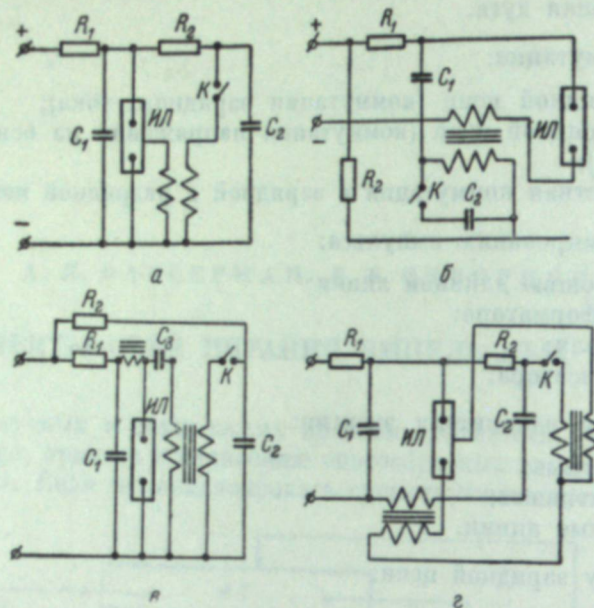


Рис. 2. Схема зажигания импульсных ламп.
а — внешнее зажигание; б — последовательное зажигание;
в — параллельное зажигание; г — смешанное зажигание.

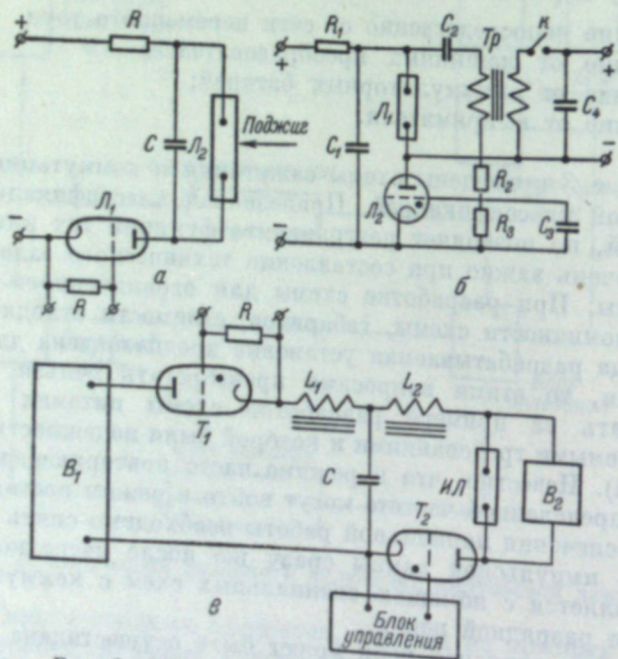


Рис. 3. Схемы коммутации импульсных ламп.
а — в зарядной цепи; б — в разрядной цепи; в — совместная
коммутация в разрядной и зарядной цепи.

он не технологичен в производстве и имеет относительно большой габарит. Более экономичной оказалась схема, в которой нулевая пауза напряжения на электродах лампы обеспечивается с помощью малогабаритного трансформатора, как это показано на рис. 4.

Схема работает следующим образом: в первый момент зарядки конденсатора C_2 на вторичной обмотке трансформатора Tr_1 возникает напряжение, обратное по знаку напряжению источника питания. Коэффициент трансформации трансформатора Tr_1 подбирается таким образом, чтобы это напряжение оказалось равным напряжению источника питания. Благодаря этому суммарное напряжение, приложенное в первый момент после очередной вспышки к электродам лампы, равно нулю. Таким образом, достигается необходимая для восстановления электрической прочности лампы пауза напряжения. Данная схема по сравнению со схемой с дросселем обладает преимуществом, так как сердечник трансформатора собирается из пластин обычной электротехнической стали и имеет меньшие габариты. С точки зрения выбора способа формирования импульса схема питания строботрона ИСП-10 также представляет интерес. По условиям задачи длительность светового импульса ИСП-10 не должна превышать 20 мксек. При формировании импульса от конденсатора это достигается при конденсаторе емкостью 0.2 мкф, заряжаемого до напряжения 1000 в.

Более короткий импульс колоколообразной формы может быть получен с применением импульсного трансформатора, который одновременно служит для формирования импульса и для зажигания строботрона.

В схеме электропитания капиллярной импульсной лампы большой мощности (рис. 3, в) для формирования импульсов света длительностью 2-3 мксек. используется дроссель L_2 с индуктивностью 2 мГн. Благодаря дросселю разряд рабочего конденсатора начинается как колебательный, но при переходе тока через нуль обрывается из-за наличия тиратрона T_2 , при этом конденсатор оказывается заряженным до напряжения обратной полярности. Электрическая энергия, оставшаяся в конденсаторе после разряда, выделяется в зарядном сопротивлении, что несколько снижает КПД разрядного контура. КПД разрядного контура в данной схеме при $C=200$ мкф и $L_2=2$ мГн составляет 80%. Эта схема интересна также тем, что она позволяет осуществить начальную ионизацию газа в лампе за счет подпитки ее дежурным разрядом от вспомогательного выпрямителя.

При разработке схемы, как правило, всегда желательно иметь напряжение источника питания возможно меньшим. Это упрощает выпрямительное устройство. Имеется ряд схем, в которых в момент зажигания к электродам лампы прикладывается удвоенное напряжение. Это достигается, например, использованием разряда емкости через дроссель.

Непременным элементом большинства схем с импульсными лампами является импульсный трансформатор, с помощью которого осуществляется

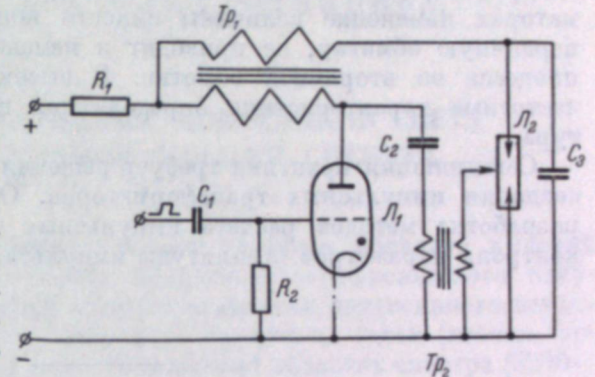


Рис. 4. Схема питания строботрона ИСП-10, обеспечивающая паузу напряжения на электродах лампы 1 мксек.

R_1 — 5 ком, 10 Вт; R_2 — 41 ком, 0.25 Вт; C_1 — 0.1 мкф, 200 в; C_2 — 0.01 мкф, 1000 в; C_3 — 0.2 мкф, 1000 в; Tr_1 — первичная обмотка 50 витков, $\varnothing$ 0.62 мм, вторичная обмотка 1500 витков, $\varnothing$ 0.62 мм; Tr_2 — первичная обмотка 100 витков, $\varnothing$ 0.1 мм, вторичная обмотка 2000 витков, $\varnothing$ 0.07 мм; J_1 — тиратрон ТГИ-1 1/10; J_2 — строботрон ИСП-10.

их зажигание. Современные импульсные трансформаторы, предназначенные для зажигания ламп, существенно отличаются от трансформаторов, которые используются в радиоселектронной технике. Если в последней они работают, как правило, на согласованную активную нагрузку, то в схемах зажигания импульсных ламп нагрузка носит емкостный характер, параметры которой подчас неизвестны или подвержены неконтролируемому изменению. Литературные данные о конструировании импульсных трансформаторов для импульсных ламп весьма ограничены. Существующие импульсные трансформаторы можно классифицировать по их частотным характеристикам (низкочастотные — $20 \div 40$ кгц и высокочастотные — $0.1 \div 1$ мгц) и типу магнитопровода.

Частотные характеристики низкочастотных импульсных трансформаторов определяются параметрами вторичной обмотки. В этих трансформаторах изменение величины емкости конденсатора, разряжаемого на первичную обмотку, не приводит к изменению частоты колебательного процесса во вторичной обмотке. В высокочастотных трансформаторах частотные характеристики определяются параметрами первичного контура.

Сегодняшняя практика требует решения целого ряда задач в области создания импульсных трансформаторов. Основными из них являются: разработка методов расчета импульсных трансформаторов и методики контроля параметров (амплитуды импульса, крутизны фронта и частоты).

М. П. ВАНЮКОВ, Н. М. ГАЛАКТИОНОВА,
А. А. МАК

ИЗЛУЧЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Интенсивный искровой разряд, канал которого обладает высокой температурой, является источником мощного ультрафиолетового излучения. В данной работе изучены спектры излучения интенсивного искрового разряда, происходящего в атмосфере различных газов (ксенон, аргон, неон, воздух) в видимой и ультрафиолетовой областях спектра (2200—5500 Å).

Исследование временных спектров силы света проводилось на трехканальной фотоэлектрической спектральной установке с использованием метода накопления [1]. Временное разрешение установки составляло $5 \cdot 10^{-8}$ сек., спектральное — 0.2 Å.

Измерение абсолютных значений спектральной плотности яркости производилось с помощью фотоэлектрической спектральной аппаратуры с осциллографической регистрацией. Относительная спектральная чувствительность установки определялась с помощью эталонной ленточной лампы накаливания с увиолевым окном и дейтериевых дуговых ламп типа ВСФУ-3 и ДСФУ-3 с сапфировым окном, проградированных в энергетических единицах спектральной плотности яркости в спектральном диапазоне 3000—2050 Å.¹

Для исключения влияния рассеянного света использовались комбинации стеклянных светофильтров УФС-1 и УФС-2, газового фильтра, представляющего собой смесь хлора и брома, и диэлектрических интерференционных светоделителей и светофильтров.² Градуировка по абсолютным значениям спектральной плотности яркости проводилась в нескольких длинах волн по эталонной лампе накаливания $T_{\text{ист}} = 3085^\circ \text{K}$, градуированной во ВНИИМе.

Искровой разряд осуществлялся в специальной разборной лампе с кварцевым окном, наполняемой различными газами до определенного давления. Длина разрядного промежутка составляла 1—2 мм. При записи спектров силы света использовался разрядный контур, состоящий из

¹ Авторы выражают искреннюю благодарность С. И. Левикову, изготовившему лампы, и М. Н. Смолкину, проградировавшему их.

² Контроль отсутствия рассеянного света производился с помощью стеклянных светофильтров БС-1 и БС-2.

батареи конденсаторов общей емкостью 0.05 мкф и индуктивностью, изменявшейся в пределах 0.04–3.6 мкГн. В случае измерения спектральной плотности яркости искрового разряда использовался разрядный контур с емкостью $C=0.1-0.2$ мкф и индуктивностью $L=0.012$ мкГн. Скорость нарастания тока $\frac{U}{L}$ составляла $10^{11}-10^{12}$ а/сек.

Результаты измерений

Исследовались спектры излучения искрового разряда, происходящего в воздухе, неоне, аргоне, ксеноне. Вид спектров представлен на рис. 1–4. Исследовались спектры в моменты времени, соответствующие максимуму излучения ($t_2=0.25-0.3$ мксек. от начала разряда), и в более поздние моменты времени ($1 \div 5$ мксек.).

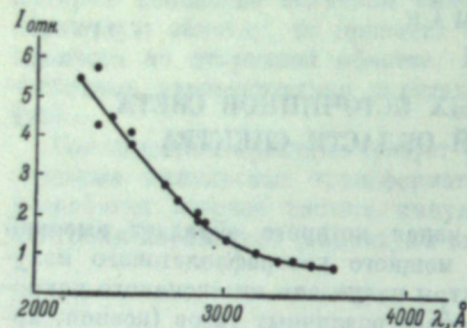


Рис. 1. Ксенон.

$p=4$ атм., $C=0.05$ мкф, $L=0.04$ мкГн, $U/L \sim 0.3 \cdot 10^{11}$ а/сек., $t_2=0.3$ мксек.

В случае газов с большим атомным номером (ксенон, аргон) (рис. 1; 2, а) спектры в моменты времени, соответствующие максимуму излучения, представляют собой сплошное излучение с сильно размытыми неразрешенными линиями однократно и двукратно ионизованных атомов газа, в котором происходит разряд; в более поздние моменты появляется большее количество линий ионизованного газа (рис. 2, б).

При разряде в более легких газах (воздух, неон) линейчатый спектр ярко выражен даже в момент времени, соответствующий максимуму излучения (рис. 3, 4).

Распределение интенсивности сплошного фона при выбранных условиях разряда сильно отличается от распределения интенсивности черного тела и почти не зависит от длины волны. В случае же ксенона излучение близко к излучению черного тела с температурой 27 000° К.

Измерялась также спектральная плотность яркости искрового разряда, происходящего в азоте, аргоне, воздухе и ксеноне в спектральном интервале 2200–5000 Å. Для всех газов распределение спектральной плотности яркости в момент времени, соответствующий максимуму излучения во всем обследованном спектральном интервале, соответствует распределению яркости абсолютно черного тела. Значения яркостных температур и соответствующих им яркостей при разряде в различных газах приведены в таблице.

При проведении этих исследований было обнаружено довольно сильное увеличение яркости в момент времени, соответствующий максимуму излучения, в области положительного электрода в случае искрового разряда, происходящего в легких газах (гелий, азот). Например, в случае искрового разряда в гелии спектральная плотность яркости при $\lambda=4250$ Å в области положительного электрода в 3 раза выше, чем в центре канала разряда. При осцилляциях напряжения на электродах яркость также осциллирует.

Газ	$T_{ц}, ^\circ K$	Мсб
Азот	60000	30
Воздух	58000	29
Аргон	55000	27.5
Ксенон	28000	11.5

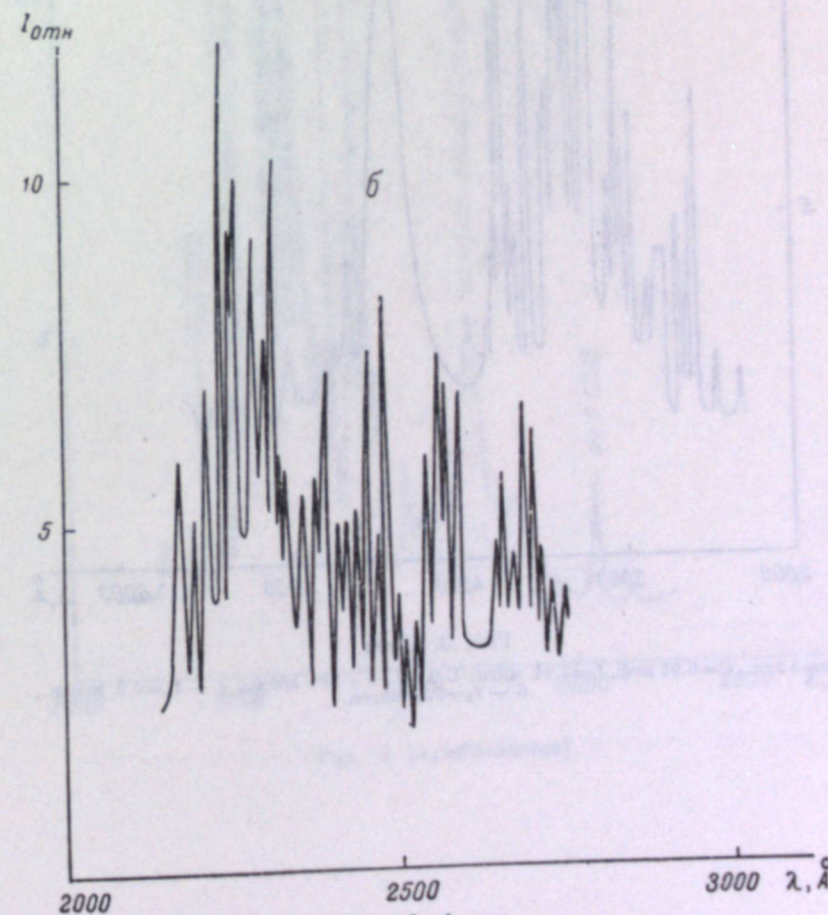
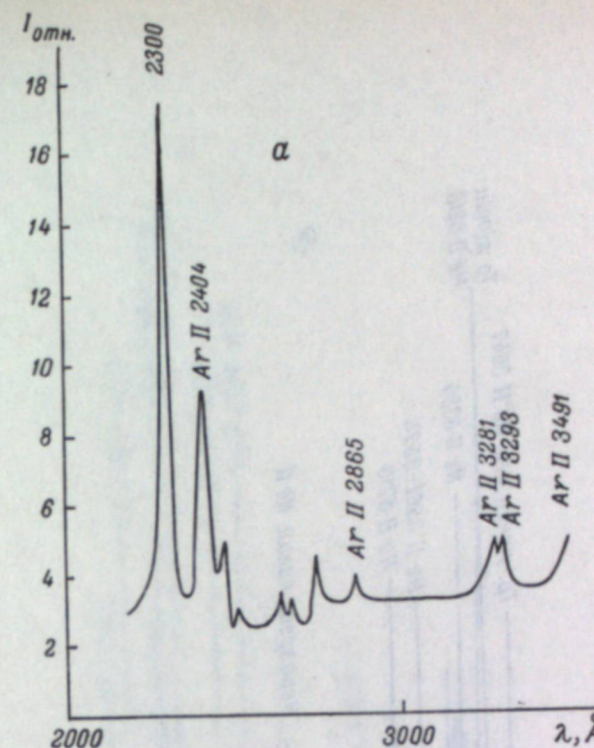


Рис. 2. Аргон.

$p=6$ атм., $C=0.05$ мкф, $L=0.04$ мкГн, $U/L \sim 0.25 \cdot 10^{11}$ а/сек.; а — $t_2=0.3$ мксек., б — $t_2=5$ мксек.

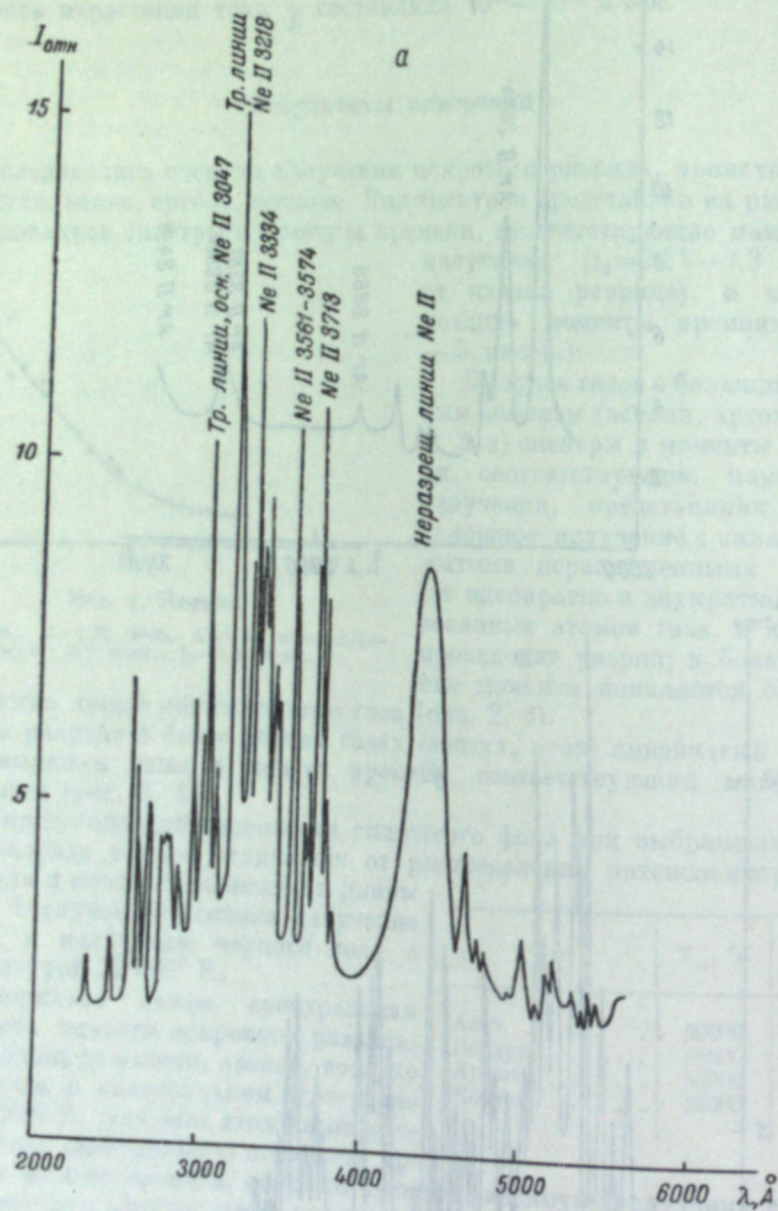


Рис. 3. Неон.

$p=5$ атм., $C=0.05$ мксф, $L=0.04$ мкгн, $U/L \sim 0.14 \cdot 10^{11}$ а/сек.; а — $t_1=0.2$ мксек.,
б — $t_2=0.5$ мксек.

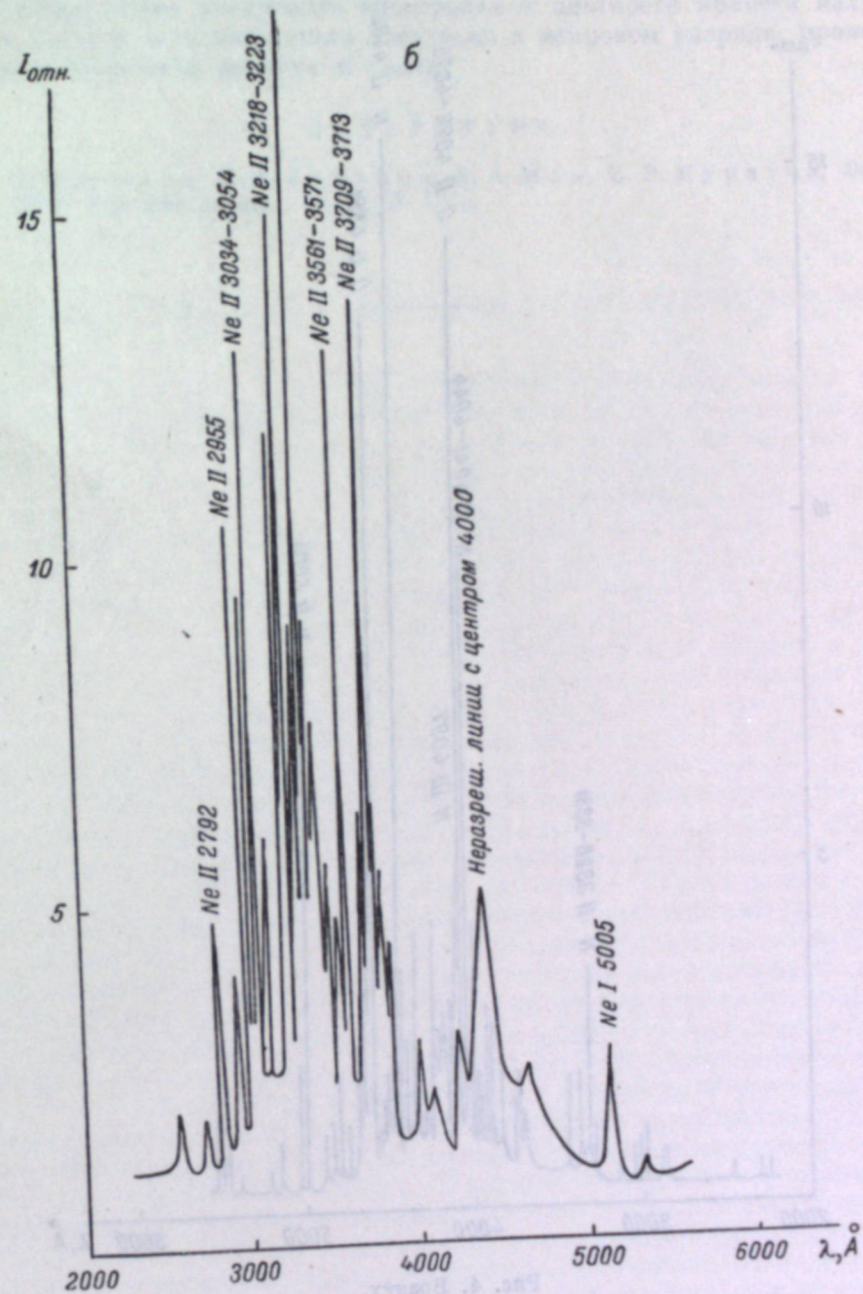


Рис. 3 (продолжение).

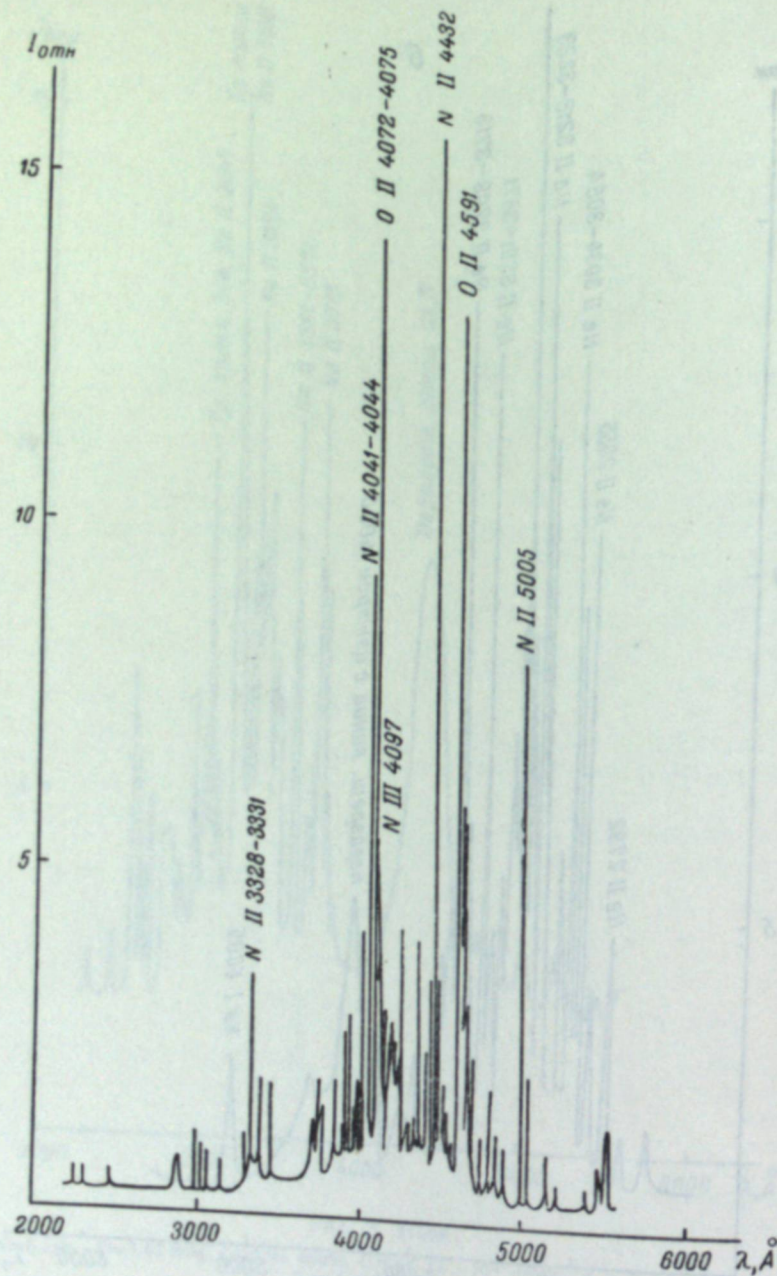


Рис. 4. Воздух.

$p=1$ атм., $C=0.05$ мкф, $L=3.6$ мкгн, $U/L \approx 2 \cdot 10^9$ а/сек., $t_2=0.45$ мксек.

Выводы

1. Распределение спектральной плотности яркости излучения интенсивного искрового разряда во всей обследованной области спектра для всех изученных газов соответствует распределению яркости абсолютно черного тела.

2. Обнаружено увеличение спектральной плотности яркости излучения в области положительного электрода в искровом разряде, происходящем в атмосфере воздуха и гелия.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. П. Ванюков, Б. А. Ермаков, А. А. Мак, В. Р. Муратов, Вестн. ЛГУ, сер. физ. и хим., 16, 3, 25, 1959.

В. А. ГАВАНИН

ФОТОМЕТРИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

В течение ряда лет на Московском Электrolамповом заводе ведутся работы по созданию методики измерения вновь разрабатываемых импульсных источников света и контроля серийно выпускаемых ламп [1]. За это время различными организациями был разработан ряд специальных приборов импульсной фотометрии [2, 3].

В настоящей статье приводится характеристика приборов и методик и дается краткое описание разработанного в лаборатории амплитудного импульсного фотометра. Производимые нами измерения импульсных световых величин можно разделить на три группы:

- 1) измерение мгновенных величин,
- 2) интегральные измерения,
- 3) измерения средней силы света строботронов.

Мгновенные значения световых величин (амплитуда силы света, амплитуда освещенности, длительность световой вспышки) обычно получают осциллографированием светового импульса.

Для этой цели мы используем набор осциллографических приборов (см. таблицу), которые позволяют нам исследовать световые вспышки с длительностью от $2 \cdot 10^{-8}$ сек. до $8 \cdot 10^{-2}$ сек. в большом диапазоне амплитуд. Большинство измерений производится приемником со спектральной чувствительностью, приведенной к стандартной кривой видности. Однако для некоторых задач измерения производятся с сурьмяно-цезиевым фотокатодом с градуировкой его по источнику «А». Однако разброс спектров чувствительности сурьмяно-цезиевых катодов значителен, и это приводит к плохой воспроизводимости данных при измерениях на различных установках.

Из представленных в таблице осциллографических приборов наиболее удобен в эксплуатации разработанный во ВНИСИ импульсный фотометр. Примененный нами здесь контроль напряжения ФЭУ непосредственно на делителе напряжения позволил значительно улучшить воспроизводимость показаний прибора при его длительной работе.

Недостатками осциллографического метода являются большая трудоемкость и малая точность измерений ($\pm 10 \div 15\%$). Эти недостатки были преодолены применением специализированных электронных приборов. Измерение длительности (на уровне 35% от максимума) мы производим микросекундомером Т576С с датчиком импульсов Т828.

Однако схема датчика недоработана, вследствие чего чувствительность прибора нестабильна. Прибор крайне чувствителен к помехам и, несмотря на примененную нами дополнительную экранировку, часто запускается от импульса поджига ламп.

Прибор	Диапазон длительности измеряемых световых импульсов, сек.	Положа пропускания	Пределы освещения	Приемник	Временные метки, мсек.	Точность измерений
ИФ-1.	$10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-3}$	15 гц — 2.5 мгц	—	ФЭУ-ВЭИ (сурьмяно-цезиевый).	0.5; 1; 5; 20; 100.	$\pm 10\%$
УИФ-1.	$10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-3}$	15 гц — 2.5 мгц	—	ФЭУ-ВЭИ.	0.5; 1; 5; 20; 100.	$\pm 10\%$
ИО-4ФЭУ.	$2 \cdot 10^{-7} \div 8 \cdot 10^{-2}$	20 гц — 6 мгц	—	ФЭУ-32.	0.1; 1; 10; 100; 1000.	$\pm 10\%$
ОС-4.	$10^{-9} \div 10^{-6}$	5 кгц — 100 мгц	—	ФЭУ-17, ФЭУ-33.	5; 10; 50.	$\pm 10\% + 0.5$ мсек.
Импульсный свечелмер ГОИ.	$50 \cdot 10^{-6} \div 1$	—	$0.5-1.4 \times 10^{-3}$ св./сек.	СЦВ-4, регистрирующее охранное кольцо.	—	$\pm 2.5\%$
ЦСМ-57.	$30 \cdot 10^{-6} \div 1$	—	$1-5 \cdot 10^5$ св./сек.	СЦВ-4, регистрирующее охранное кольцо.	—	$\pm 2.5\%$
Микросекундомер Т576С; датчик импульсов, Т828.	$10^{-6} \div 3 \cdot 10^{-2}$	—	—	СЦВ-4.	—	$\pm 5\% + 2$ мсек.
Термоэлемент с гальванометром.	$10^{-6} \div 10^{-1}$	—	От 50 св./сек.	—	—	$\pm 2.5\%$

Наметившаяся в последнее время потребность в большом количестве измерений амплитуды силы света и освещенности от световой вспышки потребовала от нас создания простого специализированного прибора для этих измерений — амплитудного фотометра (см. рисунок). Для решения этой задачи нами было применено запоминающее устройство, состоящее из конденсатора и вентиля с большим обратным сопротивлением, сохраняющее амплитудное значение импульса, до которого заряжается конденсатор на время, значительно превосходящее сам импульс. Напряжение на конденсаторе измеряется ламповым вольтметром. Для того чтобы конденсатор успел зарядиться до амплитудного напряжения того чтобы конденсатор обеспечила достаточно надежное фиксирование от импульса, а емкость обеспечила достаточно надежное фиксирование от импульса, первичный импульс фотоэлемента растягивается по схеме прибором, первичный импульс фотоэлемента растягивается по длительности тремя каскадами. Первый каскад должен оказывать малое сопротивление импульсу, чтобы при коротких импульсах (0.2 мсек.) конденсатор С успевал зарядиться до максимума. Он выполнен на двух конденсаторах 6П1П, работающих в параллель. В приборе использован ламповый вольтметр на катодных повторителях, собранный по схеме несбалансированного моста. Так как в схеме нет разделительных конденсаторов, напряжение на выходе катодных повторителей растет от каскада к каскаду, достигает 25 в и не отделяется от напряжения растянутых импульсов, поэтому в ламповом вольтметре можно подавать до 100 в при сохранении линейности. Приемником служит сурьмяно-цезиевый фотоэлемент с катодом на массивной металлической пластине с большим диапазоном линейности световой характеристики (до 10^6 лк в импульсном режиме).

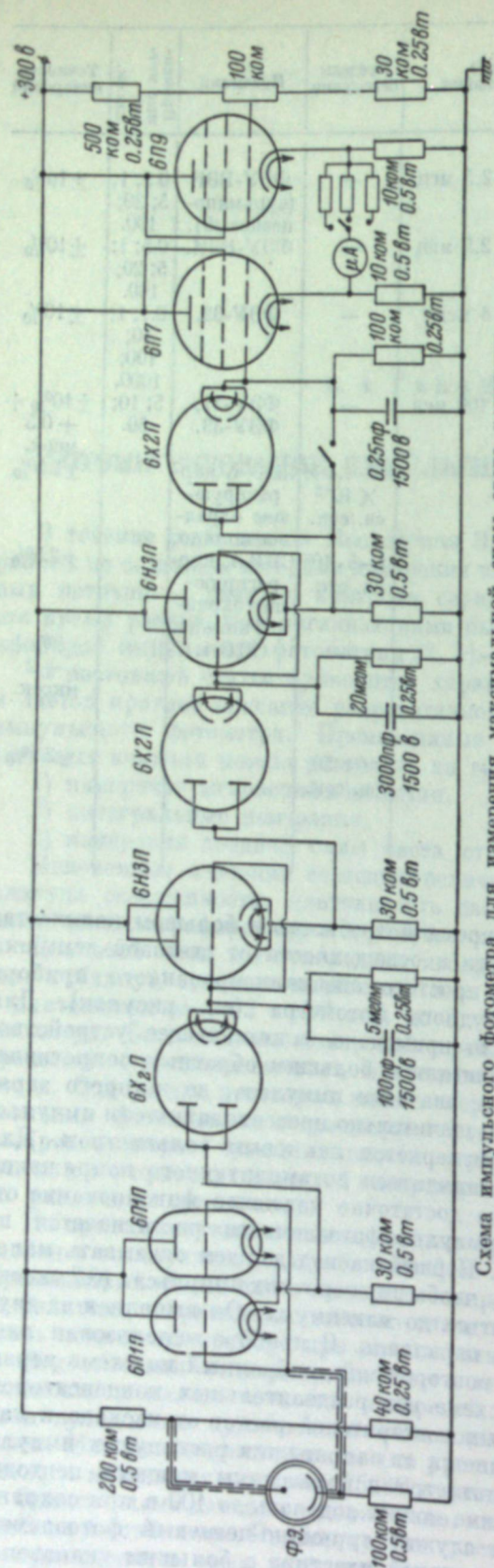


Схема импульсного фотометра для измерения максимальной силы света вспышки.

Прибор позволяет измерять вспышки с длительностью до 10^{-6} сек. Отсутствие разделительных емкостей в схеме позволяет градуировать его по источнику постоянного света (эталонная лампа накаливания 1000 св.).

Большое внимание при разработке прибора было уделено выбору фотоэлемента и исследованию его свойств при работе в импульсном режиме. Была установлена зависимость границы линейности световой (люксамперной) характеристики от напряжения на фотоэлементе и от длительности световой вспышки. Насыщение вольтамперной характеристики в импульсном режиме при больших засветках (10^5 лк) наступает при напряжениях 200—400 в. При длительности вспышек $7 \cdot 10^{-4}$ сек. наибольший диапазон линейности световой характеристики (до 10^6 лк) был получен у фотоэлементов с сурьмяно-цезиевым катодом на массивной металлической подложке (Ф-2). У фотоэлементов с сурьмяно-цезиевым фотокатодом на серебряной подложке на стекле диапазон линейности доходит до 10^5 лк.

Интегральные измерения (освещения) производились свечемерами ГОИ и ИСМ-57, баллистическим люксметром с термоэлементом и фотоумножителем (см. таблицу).

Свечемеры ГОИ и ИСМ-57 выполнены по одной принципиальной электронной схеме. Применяемая здесь телецентрическая оптика делает приборы удобными в эксплуатации, но ограничивает максимальный светящийся размер измеряемых источников (ГОИ — 100 мм, ИСМ-57 — 200 мм). Разработанная на базе интегрирующего прибора — флюксметра — новая модель свече-

мера ИСМ-58 была нами испытана и получила отрицательную оценку.

Калибровка всех названных типов свечемеров производится по лампе накаливания, перед которой устанавливается дисковый затвор. Калибровка импульсного люксметра с термоэлементом производилась по разработанной И. С. Маршаком эталонной лампе ИСКЭ-500, дающей очень хорошую воспроизводимость освещения вспышек. Ввиду малой чувствительности термоэлементов в баллистических измерениях мы также используем вакуумные фотоэлементы (Ф-2, Ф-8) и фотоумножители (ФЭУ-27, ФЭУ-32). Однако к их выбору следует подходить осторожно, исходя из необходимости соблюдения линейности световой характеристики для амплитудных значений освещенности фотокатода. Напряжение питания фотоэлемента необходимо выбирать от 300 до 1000 в в зависимости от типа фотоэлемента, амплитуды фототока и величины общего нагрузочного сопротивления в цепи фотоэлемента.

Контроль серийных типов строботронов ведется по средней силе света. Ее измерения производятся на тубус-фотометре или скорректированным под кривую стандартной видности термоэлементом.

Для уравнивания полей сравнения в тубус-фотометре подобраны специальные фильтры и лампа сравнения имеет повышенную цветовую температуру. Калибровка приборов производится по эталонной лампе накаливания (источник «А»).

Для измерения напряжения на строботронах и для измерения частоты световых вспышек применяются специальные приставки к вольтметру С-95 и частотомеру ИЧ-5А. Перечисленная в сообщении специальная аппаратура выпущена в малом количестве и ни в коей мере не удовлетворяет растущие потребности разработчиков и потребителей импульсных источников света. Необходимо в ближайшее время организовать выпуск серии приборов для импульсной фотометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Маршак. Отечественные импульсные лампы. ПТЭ, № 5, 1957.
2. Ю. М. Кутев. Интегральный свечемер. Электричество, 1, 1955.
3. Б. В. Бышев, Ю. М. Кутев. Новая модель импульсного свечемера. Светотехника, № 6, 1958.

А. А. ВОРОБЬЕВ, Г. А. ВОРОБЬЕВ,
Г. А. МЕСЯЦ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Введение

Импульсы высокого напряжения наносекундной длительности применяются для управления ячейкой Керра и электронно-оптическим преобразователем с электронным затвором.

Представляет большой интерес получение стабильных импульсов с длительностью фронта $\sim 10^{-9}$ сек. В некоторых случаях, кроме того, требуется плавная и стабильная регулировка длительности импульсов. Для производства покадровой высокоскоростной съемки необходима серия коротких импульсов с изменяемыми интервалами времени между импульсами.

Эти задачи можно решить, используя некоторые свойства искровых разрядников.

1. Некоторые вопросы теории

Из теории Вайцеля и Ромке [1] следует, что для уменьшения времени пробоя искрового промежутка t_x необходимо увеличивать давление в разряднике и напряженность поля E при пробое промежутка.

В [1] показано, что при увеличении E от 46 до 105 кВ/см величина t_x уменьшается от нескольких наносекунд до $2 \cdot 10^{-10}$ сек.

При увеличении давления от 0.5 до 3 атм. t_x уменьшается от 15 до 1 нсек. [2]. Время t_x увеличивается с уменьшением равномерности поля между электродами. При электродах острей-острие t_x более чем в два раза превосходит время коммутации при электродах шар-шар [1].

В [3, 4, 5] показано, что время запаздывания разряда t_x искрового промежутка, катод которого облучается ультрафиолетовыми лучами, при большой величине E становится очень стабильным. При этом $t_x = t_p$ — время формирования разряда; статистическое запаздывание устраняется вследствие облучения. Например, в [5] показано, что величина разбросов может быть меньше, чем 10^{-10} сек. Флетчер [5] на основании стринговой теории вывел формулу для определения t_p в воздухе при нормальных условиях. После упрощений, проведенных в [1], она имеет вид

$$t_p = \frac{1690}{\sqrt{E(E - 24400)^2}}, \quad (1)$$

где E в В/см.

Из формулы (1) следует, что с ростом E время t_p уменьшается, причем величину t_p можно изменять в пределах от единиц до десятков наносекунд [3, 5]. Если амплитуда импульса u_a остается неизменной, то менять величину напряженности можно изменением длины искрового промежутка S , так как $E = u_a/S$.

С учетом свойств разрядников, выраженных соотношением (1), были разработаны высоковольтные наносекундные импульсные устройства.

2. Устройства с использованием малого времени коммутации искровых разрядников

Для получения импульсов высокого напряжения наносекундной длительности было разработано несколько генераторов.

В работе [6] описан генератор одиночных коротких импульсов с формирующим кабелем и амплитудой 15 кВ, длиной фронта менее 1 нсек. и плавно регулируемой длительностью в интервале 5—40 нсек. В этом генераторе для уменьшения t_d используется перенапряжение на искровых промежутках.

В генераторе с формирующим кабелем амплитуда импульса в два раза меньше зарядного напряжения. Кроме того, в схеме с формирующим кабелем фронт импульса (при малых L, C) полностью повторяет характеристику коммутации, вследствие чего длительность фронта затягивается. Этих недостатков можно избежать, если в качестве формирующего элемента использовать емкость, подобранную таким образом, чтобы она снижением напряжения за счет разряда компенсировала медленный подъем при переходе от фронта к вершине. При этом U_a оказывается только на $15 \div 20\%$ меньше зарядного напряжения, а t_d в несколько раз меньше соответствующей длительности фронта в схеме с кабелем. Генератор с формирующей емкостью [7] на напряжение импульса 16 кВ вырабатывал импульсы длительностью до 3 нсек., при частоте их повторения 1—50 Гц. При работе на емкостную нагрузку в 10 пФ длительность фронта импульса не превышала 1 нсек. Для уменьшения t_d разрядная камера генератора наполнялась воздухом под давлением в 10 атм.

Был сконструирован генератор для получения импульсов с амплитудой 150 кВ, током 7.5 кА, длительностью фронта 10^{-9} сек. и длительностью плоской части импульса $2 \cdot 10^{-8}$ сек.¹ Конструкция генератора показана на рис. 1. Формирующая линия заряжается от вспомогательного импульсного генератора (ГИН) с амплитудой 300 кВ и фронтом $\sim 10^{-6}$ сек. Волновые сопротивления формирующей линии равны 20 Ом. Линии изготовлялись из медных труб, заполненных маслом. Коммутирующий разрядник встраивался последовательно с линиями и имел с ними хорошее согласование. Для уменьшения t_d разрядник заполнялся воздухом под давлением 10 атм.

3. Устройства с использованием времени формирования разряда

Для получения коротких высоковольтных импульсов обычно используют схемы с отрезками длинных линий. Длительность импульсов t_x в таких схемах регулируется длиной отрезка. Недостатками таких схем являются трудность плавной регулировки t_x и необходимость использования согласующих сопротивлений. Активные сопротивления, работающие в высоковольтных схемах наносекундного диапазона, должны сочетать в себе ряд противоречивых требований: обладать малой собственной индуктивностью и емкостью, выдерживать высокое напряжение без из-

¹ В разработке этого генератора участвовал инженер Н. С. Руденко.

менения параметров, обладать приемлемыми конструктивными формами и малыми габаритами.

В этом отношении очень перспективным является использование схем укорочения импульсов со срезающим разрядником, катод которого облучается ультрафиолетовыми лучами. В таких схемах можно полностью отказаться от согласующих сопротивлений и осуществлять плавную регулировку длительности импульса изменением длины промежутка. При этом большая напряженность поля E в промежутке обеспечивается бла-

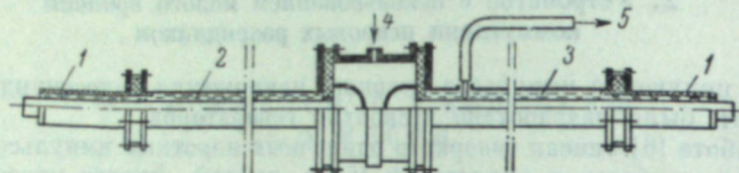


Рис. 1. Конструкция генератора импульсов с амплитудой 150 кв.

1 — проходной изолятор; 2 — формирующая линия; 3 — передающая линия; 4 — ввод газа; 5 — вывод импульса.

годаря крутому фронту импульса. Одна из таких схем исследована в [8] и использована в генераторе [6], а другая приведена на рис. 2.

Импульс поступает по кабелю L к нагрузке R_n и срезающему разряднику P_c , промежуток которого облучается от вспомогательной искры. После истечения времени формирования t_p , определяемом длиной промежутка S , промежуток пробивается и шунтирует R_n . Интервал времени t_p соответствует плоской части импульса. После установки другой длины промежутка интервал времени t_p изменяется и соответственно изменяется длительность импульса. Амплитуда импульса определяется из соотношения

$$U_a = 2U_0 \frac{R_n}{R_n + \rho},$$

Рис. 2. Схема «среза» импульсов.

где U_0 — напряжение импульса, поступающего по кабелю L , ρ — волновое сопротивление кабеля.

Для синхронизации срабатывания генератора и вспомогательной искры хорошо себя зарекомендовало устройство, описанное в [6].

Для иллюстрации работы схемы среза на рис. 3 (см. вклейку, стр. 113) представлены осциллограммы импульсов с фронтом $t_f = 3$ нсек. и амплитудой 10 кв. При помощи схемы среза можно получать короткие импульсы пиковой формы даже в том случае, если первичный импульс имеет сравнительно длинный фронт (рис. 4, а). На рис. 4, б представлена зависимость параметров импульса с $U_a = 15$ кв и $t_f = 20$ нсек. от длины срезающего промежутка S при $R_n = \rho$. В ходе $t_2(S)$ имеется минимум, который объясняется следующим образом. При малых S пробой происходит в начале фронта, поэтому уменьшение напряжения U_f на разряднике пробоя компенсируется возрастанием напряжения на фронте $U(t)$, так как $U_{cr} \sim \frac{1}{t}$, а $U(t) \sim t$. При больших S увеличение t_2 происходит вследствие уменьшения E . Уменьшить величину t_2 при неизменном t_f можно, поместив P_c в сжатый газ.

Линия L в схеме играет двойную роль. Во-первых, уменьшаются паразитные параметры L , C вследствие отделения P_c , R_n от разрядного

контура. Во-вторых, уменьшается длительность среза импульса. Если R_n и P_c подключить на выходе генератора, то напряжение среза

$$U_{cr} = \frac{U_0}{1 + \frac{r_k}{r_c}},$$

где r_k — внутреннее сопротивление коммутатора, а r_c — срезающего разрядника. Через некоторое время после пробоя P_c величины r_k и r_c

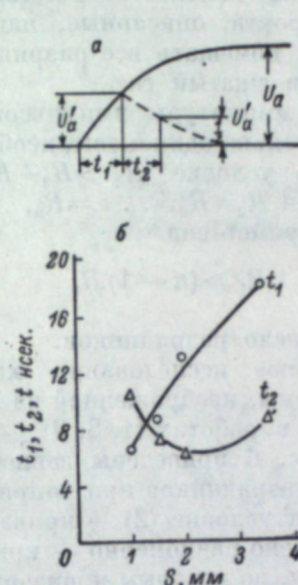


Рис. 4. Зависимость параметров импульса от длины промежутка.

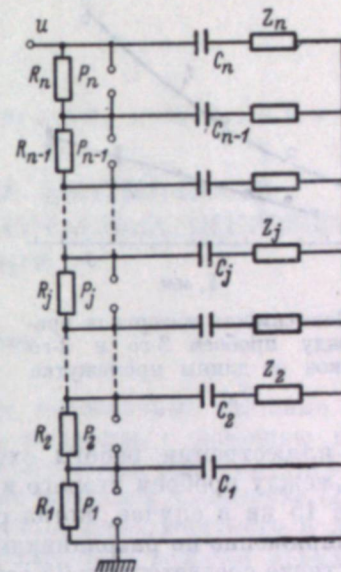


Рис. 5. Схема для получения серии последовательных импульсов.

станут соизмеримыми, вследствие чего уменьшение U_{cr} замедляется. Если же P_c отделен от разрядного контура кабелем, то

$$U_{cr} = \frac{U_0}{1 + \frac{\rho}{2r_c}}.$$

Вскоре после пробоя P_c начинает удовлетворяться соотношение $r_c \ll \frac{\rho}{2}$, поэтому U_{cr} быстро падает до нуля.

На рис. 5 приведена схема для получения серии импульсов высокого напряжения с регулируемым интервалом следования импульсов. Разрядники P_1 и P_n располагаются так, чтобы взаимно облучать друг друга при пробое.

После пробоя P_1 и P_2 прикладывается добавочное напряжение и через интервал времени t_2 этот промежуток пробивается при возросшей напряженности поля. Так последовательно пробиваются все n разрядников, причем каждый последующий разрядник пробивается через некоторый интервал времени t_j после пробоя предыдущего.

При пробое разрядников P_1, P_n на соответствующие нагрузки z_1, z_n разряжаются емкости C_1, C_n , и на этих нагрузках появляются высоковольтные импульсы. Промежуток времени между импульсами можно плавно регулировать изменением длины соответствующего искрового промежутка. Если вместо емкостей C_1, C_n подключить отрезки кабелей,

или при наличии $C_1 C_n$ к нагрузкам $z_1 z_n$ подключить схемы среза, то можно получать короткие импульсы.

В [1] показано, что при изменении длин искровых промежутков длительность фронта t_f практически не изменяется, хотя при этом и происходит изменение E . Это объясняется тем, что в процессе пробоя промежутков происходит наложение характеристик коммутации разрядников. Однако этот эффект слабо влияет на регулируемость и стабильность промежутка времени τ_j .

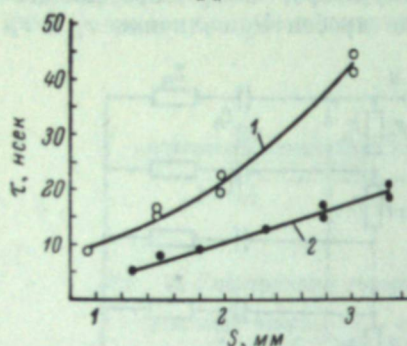


Рис. 6. Зависимость интервала времени между пробоем 2-го и 3-го разрядников от длины промежутка S_3 .

Для иллюстрации работы схемы на рис. 6 приведены зависимости времени между пробоем второго и третьего разрядников при напряжении на входе 15 кв в случае, когда соблюдается условие (2) — кривая 1, и когда напряжение по разрядникам распределено равномерно — кривая 2. Каждой точке соответствует 25 осциллограмм, по которым производились измерения. Вертикальные линии между точками указывают на разброс наблюдаемых величин. Наименьший зарегистрированный интервал времени между импульсами составляет 5 нсек. При увеличении сопротивления нагрузок z_j стабильность промежутка времени τ_j ухудшается из-за ослабления ультрафиолетового излучения искры. В этом случае целесообразно между верхними электродами и землей подключать добавочные емкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Месяц, Канд. дисс., Томск, 1961.
2. А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев, Г. А. Месяц, Ю. П. Усов, Изв. вузов, Физика, № 5, 1961.
3. Г. А. Месяц, Изв. вузов, Физика, № 4, 1960.
4. Д. Мик, Д. Краге, Электрический пробой в газах. ИЛ, 1960.
5. R. C. Eletcher, Phys. Rev., v. 76, № 10, 1949.
6. А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев, Г. А. Месяц, А. И. Голынский, ПТЭ, № 1, 1962.
7. Г. А. Воробьев, Г. А. Месяц, Г. С. Коршунов, ПТЭ (в печати).
8. Г. А. Месяц, Тр. III Межвуз. конф. по электронным ускорителям, Изд. ТГУ, 1961.
9. Г. А. Месяц, У. Я. Преднекс, Изв. вузов, Энергетика, № 3, 1962.

Для уменьшения t_f можно использовать методы коррекции фронта, описанные, например, в [6], или помещать все разрядное устройство в сжатый газ.

Чтобы амплитуды импульсов были приблизительно одинаковы, необходимо соблюдать условие $R_1 > R_2 + R_3 + \dots + R_n$. Если $R_2 = R_3 = \dots = R_n$, то это условие примет вид

$$R_1 \gg (n-1)R, \quad (2)$$

где n — число разрядников.

Подробное исследование характеристик схемы, изображенной на рис. 5, приведено в работах [1, 8, 9].

С. И. АНДРЕЕВ, М. П. ВАНЮКОВ, Е. В. ДАНИЭЛЬ

МЕТОДЫ СОКРАЩЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СВЕТОВЫХ ВСПЫШЕК, ИЗЛУЧАЕМЫХ ИСКРОВЫМ РАЗРЯДОМ

Введение

Ранее было найдено, что наиболее интенсивные световые вспышки длительностью 10^{-7} — 10^{-8} сек. можно получить с помощью искрового разряда, осуществляемого в атмосфере азота или воздуха [1]. Были изучены также условия получения таких вспышек в воздухе [2, 3, 4] и проведены исследования [5] капиллярного, поверхностного и демпфированного добавочным сопротивлением искрового разряда в воздухе, которые показали возможность получения более интенсивных вспышек, чем в случае открытого искрового разряда, осуществляемого при оптимальных условиях. Увеличение интенсивности коротких световых вспышек может быть получено также при введении в разрядный промежуток системы металлических пластин, расположенных перпендикулярно оси промежутка [6]. Опыты, описанные в работах [5, 6], проводились в атмосфере воздуха.

В настоящем сообщении приводятся результаты исследования искрового разряда по поверхности керамики и при введении в искровой промежуток системы металлических пластин для случая, когда разряд происходит в атмосфере аргона.

Техника эксперимента

Исследования проводились в разборной лампе, конструкция которой показана на рис. 1. В этом устройстве разрядный промежуток окружен плексигласовым цилиндром 1, позволяющим производить одиночные разряды при давлении газа до 15 атм. Керамические конденсаторы 2 типа КВИ располагаются вокруг плексигласового корпуса лампы. Ввод газа 3 и поджиг 4 производятся через электроды 5. Индуктивность разрядной цепи (L) такой конструкции составляет 15 нгн. Рабочее напряжение (U_0) может быть увеличено до 15 кв (значение U_0 может достигнуть величины 10^{12} а/сек.). Расход газа в лампе очень мал.

Осциллографирование тока разряда производилось с помощью безиндуктивного шунта [7] с временным разрешением 10^{-9} сек. [2]. Световые вспышки регистрировались фотоэлектрической методикой с временным разрешением $3 \div 5 \cdot 10^{-9}$ сек. [3]. Методика определения изменяющегося во времени сопротивления разрядного промежутка описана в работе [2].

Результаты эксперимента

1. Разряд при наличии в искровом промежутке системы металлических пластин

Приведенные на рис. 2 (см. вклейку, стр. 113) осциллограммы показывают, что введение в разрядный промежуток системы металлических

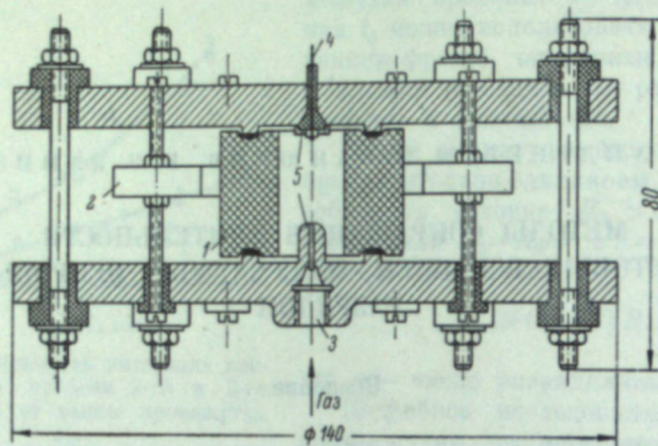


Рис. 1. Устройство разборной импульсной лампы высокого давления.

пластин приводит к сокращению длительности импульса разрядного тока и устранению послесвечения. Амплитуда яркости вспышки при этом практически не изменяется.

В результате имеется возможность эффективно использовать для получения интенсивных и коротких световых вспышек разряд в газах, обла-

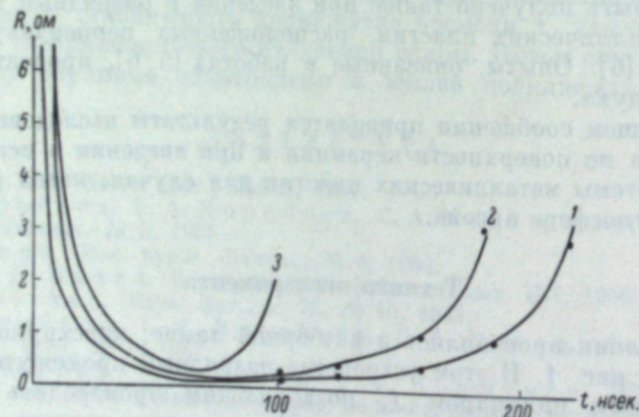


Рис. 3. Изменение во времени сопротивления канала искры в аргоне при наличии системы металлических пластин (3) и без нее (1 и 2).

Кривая 1 соответствует $p=1$ атм., $U_0=12.1$ кв; кривая 2 — $p=3$ атм., $U_0=15.7$ кв; кривая 3 — $p=1$ атм., $U_0=12.0$ кв. Параметры разряда $C=6000$ пф, $L=15$ нгн, $d=4.7$ мм.

дающих сравнительно большим временем послесвечения, например в аргоне. Известно, что при осуществлении разряда в режиме, близком к самопробою, разряд в атмосфере аргона характеризуется более коротким импульсом тока по сравнению с разрядом той же энергии в атмосфере воздуха или азота [1]. Величина амплитуды силы света вспышки в этих

условиях оказывается примерно одинаковой, и только наличие длительного послесвечения, возникающего при энергиях разряда $W_0 \gg 0.05$ дж, делает аргон менее эффективным газом для получения ультракоротких

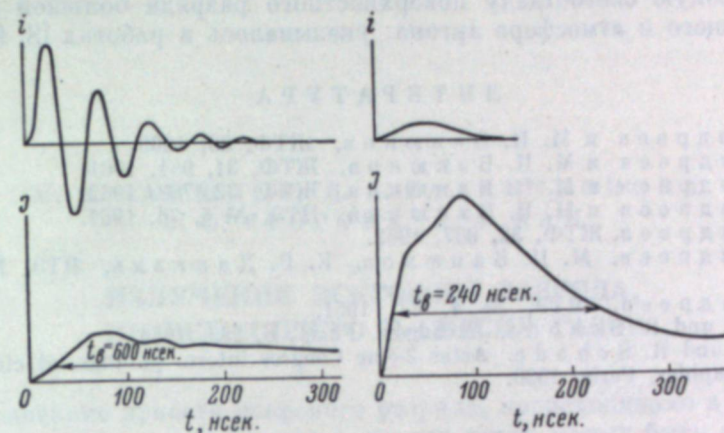


Рис. 4. Изменение во времени силы тока разряда (i) и силы света вспышки (J) при открытом (а) и при поверхностном разряде (б).

$C=6000$ пф., $L=15$ нгн, $U_0=8.8$ кв, $p=6$ атм.

и интенсивных световых вспышек, чем азот или воздух. Возможность существенного сокращения послесвечения в аргоне с помощью описываемого метода при легко достижимом в этом газе условии аperiodического разряда [1] позволяет получать световые вспышки малой длительности с большей силой света, чем в воздухе или азоте. Число пластин необходимо увеличивать по мере увеличения энергии разряда и давления аргона.

Следует отметить, что, так же как и в случае разряда в воздухе [6], введение системы пластин увеличивает общее сопротивление канала искры (рис. 3), что приводит к более быстрому выделению энергии на этом сопротивлении.

2. Разряд по поверхности керамики

Интересные явления наблюдались нами при разряде по поверхности высокопроницаемой (диэлектрическая проницаемость $\epsilon=150$) керамики, находящейся в атмосфере аргона. В этом случае наблюдалось резкое демпфирование разряда и увеличение амплитуды силы света в вспышке в несколько раз по сравнению с разрядом, осуществляемым в воздухе при открытом промежутке (пробивное напряжение в последнем случае примерно в 5 раз больше, чем в первом), величина сопротивления единицы длины разрядного промежутка в случае разряда по поверхности керамики больше, чем в открытом промежутке (рис. 5).

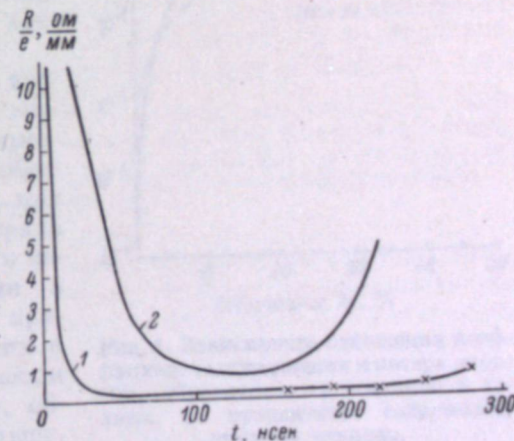


Рис. 5. Изменение во времени сопротивления единицы длины разрядного промежутка при открытом разряде (1) и при разряде по поверхности керамики (2).

Аргон, $p=8$ атм., $U_0=8.0$ кв.

Таким образом, при разряде в аргоне по поверхности керамики существенно сокращается длительность световой вспышки и увеличивается ее интенсивность.

На высокую светоотдачу поверхностного разряда большой энергии, происходящего в атмосфере аргона, указывалось в работах [8, 9].

ЛИТЕРАТУРА

1. С. И. Андреев и М. П. Ванюков, ЖТФ, 33, 1963.
2. С. И. Андреев и М. П. Ванюков, ЖТФ, 31, 961, 1961.
3. С. И. Андреев и М. П. Ванюков, ЖТФ, 32, 738, 1962.
4. С. И. Андреев и М. П. Ванюков, ПТЭ, № 4, 76, 1961.
5. С. И. Андреев, ЖТФ, 32, 967, 1962.
6. С. И. Андреев, М. П. Ванюков, Е. В. Даниэль, ПТЭ, № 2, 127, 1962.
7. С. И. Андреев, ПТЭ, № 4, 87, 1961.
8. H. Luy und R. Schade, Z. angew. Phys., 6, 253, 1954.
9. H. Luy und R. Schade. Actes 2-ème Congres intern. fotogr. et cinematogr. ultra-rapides, Paris, 1956.

М. П. ВАНЮКОВ, Н. А. ГАЛАКТИОНОВА,
В. Ф. ЕГОРОВА, А. А. МАК

ИЗЛУЧЕНИЕ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА, ПРОИСХОДЯЩЕГО В СМЕСЯХ ГАЗОВ

Исследование яркости искрового разряда, происходящего в атмосфере различных газов, показало, что в легких газах может быть достигнута высокая температура канала, однако вследствие малой величины коэффициента поглощения канала разряда предельная яркость в этих газах достигается лишь в условиях жестких режимов разряда и высокого давления газа [1, 2]. С другой стороны, в тяжелых инертных газах предельные яркости невелики, но непрозрачность канала достигается при сравнительно мягких режимах разряда и низких давлениях.

В настоящей работе изучалась возможность создания такой смеси легкого (основного) и тяжелого (примесного) газов, которая позволила бы обеспечить высокую яркость канала при сравнительно мягких режимах разряда и низких давлениях газа. Для этого необходимо, чтобы потери энергии в разряде, обусловленные тяжелой примесью, были бы малы по сравнению с потерями, обусловленными основным газом, а коэффициент поглощения, обусловленный примесью, был бы больше, чем коэффициент поглощения в основном газе.

Для определения оптимальной концентрации примеси были рассчитаны:

- 1) отношение K потерь энергии в канале, обусловленных примесью, к потерям энергии, обусловленным основным газом. При расчете учитывались потери энергии в канале на нагрев, ионизацию и диссоциацию;
- 2) отношение L коэффициентов поглощения примеси и основного газа. При расчете использовались выводы теории Крамерса—Унзольда для сплошного излучения плазмы [3].

Необходимая для расчета равновесная ионизация плазмы находилась с помощью гидродинамических соотношений и уравнения Саха (см. [3]).

Все расчеты производились на электронной счетной машине «Урал 1».

Расчеты показали, что наибольший интерес представляют смеси газов, сильно различающихся по атомному весу (например, $He+Xe$), причем

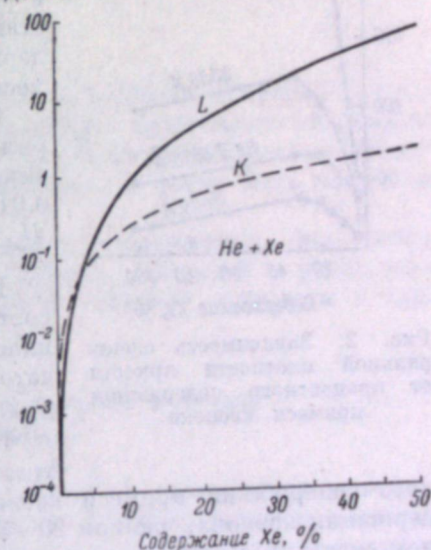


Рис. 1. Зависимость отношения коэффициентов поглощения и потерь энергии, обусловленных ксеноном и гелием, от процентного содержания примеси ксенона.

при определенных процентных соотношениях компонент смеси. В качестве примера на рис. 1 приведены кривые зависимостей отношения коэффициентов поглощения и потерь энергии примеси и основного газа от процентного содержания примеси для случая смеси ксенона и гелия.

Как видно из рис. 1, при концентрации ксенона $10 \div 30\%$ доля потерь, обусловленных ксеноном, еще невелика, а поглощение в канале обуслов-

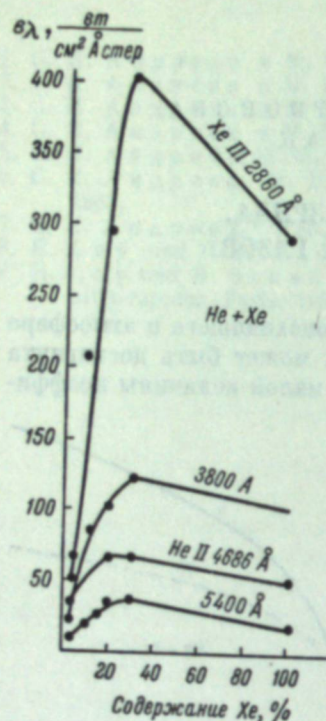


Рис. 2. Зависимость спектральной плотности яркости от процентного содержания примеси ксенона.

На рис. 2 приведены зависимости спектральной плотности яркости от процентного содержания примеси ксенона. Кривые имеют максимум при содержании ксенона, равном $20-30\%$, что находится в удовлетворительном согласии с результатами расчета. Превышение спектральной плотности яркости в сравнении с яркостью разряда в чистом ксеноне составляет $20-100\%$. При этом наибольший выигрыш в яркости получается для длинноволнового сплошного излучения, что, очевидно, обусловлено большим коэффициентом поглощения плазмы в длинноволновой области спектра.

При исследовании разряда в смеси $\text{He} + \text{Ar}$ не было обнаружено существенного увеличения яркости в канале разряда по сравнению с разрядом в чистом Ar .

Таким образом, установлено, что при осуществлении искрового разряда в смеси гелия и ксенона при определенном соотношении компонент может быть получен выигрыш в яркости, достигающий двукратного, по сравнению с разрядом в чистом ксеноне.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. П. Ванюков, А. А. Мак, УФН, 66, 301, 1958.
2. М. П. Ванюков, А. А. Мак, А. И. Садыкова, ДАН СССР, 135, 557, 1960.
3. В. Ф. Егорова, В. И. Исаенко, А. А. Мак, А. И. Садыкова, ЖТФ, 32, 338, 1962.

С. И. АНДРЕЕВ, М. П. ВАНЮКОВ

ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ СВЕТОВЫХ ВСПЫШЕК ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ $10^{-7} \div 10^{-8}$ сек. С ПОМОЩЬЮ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА

Введение

В последнее время появился ряд работ, в которых искровой разряд применялся для получения световых вспышек длительностью короче 10^{-7} сек. [1—5]. Однако в этих работах не обследовался весьма существенный вопрос: какие предельные интенсивности могут быть получены у таких вспышек?

В настоящей работе делается попытка исследования физических условий, определяющих связь между энергией, вводимой в разрядный промежуток, и параметрами возникающей световой вспышки — длительностью и интенсивностью ее свечения.

1. Выделение электрической энергии в канале искрового разряда

Длительность световой вспышки определяется длительностью поступления электрической энергии в канал искры и высвечиванием нагретой плазмы после окончания выделения энергии в разрядном промежутке.

Для определения характера выделения энергии в разрядном промежутке была разработана аппаратура и методика, с помощью которой можно было исследовать электрические процессы в искре с временным разрешением $1 \div 2 \cdot 10^{-9}$ сек.

В контуре, состоящем из последовательного соединения емкости C , индуктивности L и переменного во времени сопротивления канала искры R , единственным параметром, изменение которого не связано с величиной энергии разряда, является индуктивность L . Уменьшение индуктивности контура вызывает увеличение скорости поступления энергии в разрядный промежуток и, таким образом, при сохранении энергии разряда приводит к сокращению длительности электрического импульса. При этом возникает вопрос: какой предел имеет уменьшение L и разумно ли стремиться к достижению этого предела.

Экспериментальные данные, полученные для случая искрового разряда в воздухе, показывают, что крутизна нарастания тока, определяющая скорость поступления энергии в разрядный промежуток, определяется при малых значениях L также сопротивлением канала искры и емкостью рабочего конденсатора.

На рис. 1 в качестве иллюстрации приведены данные относительно электрических процессов, имеющих место в разрядном контуре, в котором собственная индуктивность канала L_K составляет значительную часть общей индуктивности контура L . Индуктивность канала изменяется во времени вследствие изменения диаметра канала и для начальной стадии разряда в воздухе составляет $8 \div 10$ нГн/см. Из рис. 1 видно, что значительная часть энергии выделяется в искровом промежутке в течение первого полупериода колебаний тока, когда скорость выделения энергии P наиболее высока. При большой длине разрядного промежутка в момент времени t_{m_0} , когда крутизна нарастания тока di/dt достигает максимального значения, падение напряжения на активном сопротивлении канала искры U_R не равно нулю, в результате чего равенство

$$\frac{di}{dt_{\max}} = \frac{U_0}{L}, \quad (1)$$

которое обычно имеет место при больших индуктивностях, не соблюдается.

Решение соответствующего дифференциального уравнения для начальной стадии разряда позволило установить связь между величинами C , L и R и максимальным значением крутизны нарастания тока:

$$\frac{di}{dt_{\max}} = \varphi \frac{U_0}{L} = \frac{E_0}{\frac{t_{m_0}^2}{4LC} + \frac{2}{3} \frac{R_m}{l} t_{m_0} + \frac{L}{l}}, \quad (2)$$

где E_0 — пробивная напряженность поля, R_m — сопротивление канала искры в момент t_{m_0} , l — длина канала, φ — численный коэффициент, характеризующий «жесткость» разряда.

Первый член в знаменателе характеризует влияние емкости разрядного контура. Экспериментальные данные показывают, что при не слишком малых емкостях этот член мал по сравнению со вторым, который определяется сопротивлением канала искры. Оказывается, что для жестких режимов разрядов, т. е. при $\varphi \leq 0.8$, второй член в знаменателе $\frac{2}{3} \frac{R_m}{l} t_{m_0}$ представляет собой практически постоянную величину, не зависящую от параметров контура и пробивного градиента поля E_0 . Для воздуха эта величина равна примерно $10^{-7} \frac{\text{ом} \cdot \text{сек.}}{\text{см}}$. Третий член в знаменателе L/l , представляющий собой отношение индуктивности контура к длине канала искры, целесообразно уменьшить примерно

до 30 нГн/см. Дальнейшее уменьшение этой величины не приводит к существенному увеличению крутизны нарастания тока, так как последняя лимитируется главным образом сопротивлением канала.

Представляет интерес уменьшение длительности выделения энергии при сохранении ее величины. Единственно возможный путь — это уменьшение разрядной емкости C при соответствующем увеличении напряжения U_0 . При заданном значении пробивного градиента поля E_0 увеличение U_0 приводит к увеличению длины разрядного промежутка. Чтобы определить предельные соотношения, которые могут быть получены таким путем, рассмотрим характер изменения удельного сопротивления плазмы ρ и сопротивления канала R .

Из рис. 2 следует, что в воздухе при E_0 , равном $25 \div 30$ кВ/см, спад ρ длится в течение $6 \div 8$ нсек. Величина R вначале резко падает в соответствии с быстрым изменением ρ , а затем, после достижения ρ постоянного значения, R изменяется медленно за счет расширения канала искры и примерно через $20 \div 30$ нсек. в жестких режимах разряда достигает значений, соответствующих дуговой стадии разряда. Экспериментальные данные показывают, что ход ρ и $\frac{R}{l}$ в начальной стадии разряда определяется в основном величиной E_0 . Таким образом, для получения минимальной длительности электрического импульса необходимо выделить энергию в интервале времени между 6 и 20 нсек. Действительно, если длительность выделения энергии меньше 6 нсек., то состояние высокотемпературной плазмы не будет достигнуто, что соответствует случаю вырождения искры. Если энергия не успеет выделиться за $20 \div 30$ нсек., то оставшаяся часть энергии будет медленно выделяться на малом сопротивлении канала искры в дуговой стадии разряда.

Из решения дифференциального уравнения, описывающего электрические процессы в искре, можно получить, что в случае предельно жесткого режима разряда в воздухе ($L_K \gg L_0$) 95% энергии выделяется в течение первых трех полупериодов собственных колебаний данного контура. В этом случае указанное выше условие получения минимальной длительности электрического импульса выразится в виде

$$0.2 \cdot 10^{-5} \leq U_0 C < 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ ф} \cdot \text{в.} \quad (3)$$

Например, при заданном напряжении 20 кВ емкость конденсатора должна лежать в пределах от 100 до 700 пФ, что при соблюдении жесткого режима разряда дает минимально возможную энергию 0.14 дж при длительности 20 нсек. и 0.02 дж при длительности 6 нсек.

Приведенные выше соображения подтверждаются экспериментальными данными, показанными на рис. 3 (см. вклейку, стр. 168), где представлены осциллограммы тока и силы света вспышки, отличающиеся друг от друга напряжением и длиной разрядного промежутка l . При увеличении напряжения от 6 до 23 кВ и соответствующем увеличении l величина $\frac{L}{l}$ уменьша-

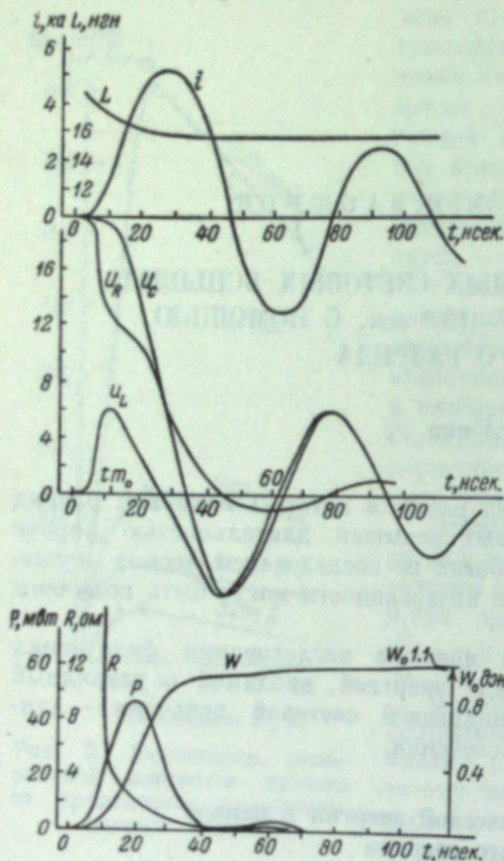


Рис. 1. Изменение во времени электрических характеристик искрового разряда в воздухе.

L — индуктивность контура с учетом индуктивности канала искры L_K , i — ток; U_0 , U_R и U_L — напряжение на емкости, сопротивлении и индуктивности разрядной цепи; P — мощность; W — энергия, выделяющаяся в разрядном промежутке. Параметры разряда: $C = 5500$ пФ, $L = 10 + L_K$ нГн, $U_0 = 20$ кВ.

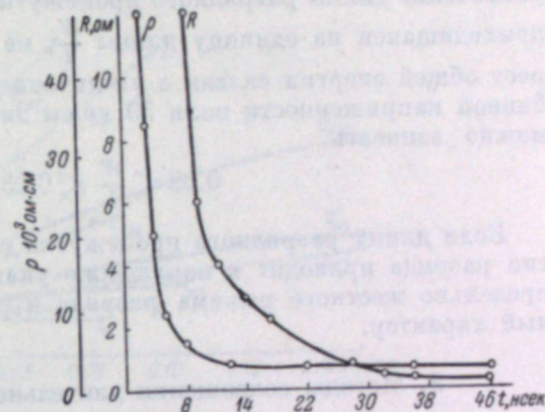


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления ρ и полного сопротивления канала искры R от времени.

Параметры разряда: $C = 5500$ пФ, $L = 10 + L_K$ нГн, $U_0 = 21$ кВ, $l = 8.4$ мм.

ется, режим разряда переходит в очень жесткий, близкий к предельному, что приводит к сокращению длительности электрического импульса при увеличении его энергии на порядок. Длительность световой вспышки при этом возрастает от $10 \div 15$ до $35 \div 40$ нсек. за счет послесвечения плазмы. Поэтому дальнейшее уменьшение длительности электрического импульса при сохранении той же энергии не может привести к значительному сокращению длительности световой вспышки, и энергия в 0.1 дж близка к предельной при получении световой вспышки длительностью $35 \div 40$ нсек. с помощью искрового разряда в воздухе.

Если увеличивать U_0 и уменьшать C в пределах отношения (3), то увеличение длины разрядного промежутка приводит к тому, что энергия, приходящаяся на единицу длины $\frac{W}{l}$, не увеличивается, и в результате рост общей энергии связан с увеличением тела свечения. Так, при пробивной напряженности поля 30 кв/см для рассмотренных выше условий можно записать

$$0.03 \leq \frac{W}{l} \leq 0.23 \text{ дж/см.} \quad (4)$$

Если длину разрядного промежутка ограничить, то увеличение энергии разряда приводит к нарушению указанного условия даже в случае предельно жесткого режима разряда и разряд приобретает колебательный характер.

2. Методы сокращения длительности световых вспышек

Если ток в разрядном контуре имеет колебательный характер, то для сокращения длительности электрического и соответственно светового импульсов имеет смысл вводить последовательно с разрядным промежутком сопротивление R_d , которое сокращает длительность электрического процесса до величины, соответствующей первому полупериоду тока. Для этого требуется различная величина добавочного сопротивления начиная от $0.8 R_{кр}$ в мягком режиме разряда и кончая практически нулем в рассмотренном выше случае предельно жесткого режима. При этом энергия распределяется между сопротивлениями канала искры и добавочным так, что на добавочном сопротивлении выделяется от 70% до нуля от общей энергии разряда в зависимости от жесткости разряда.

Хороший результат может быть достигнут при введении в качестве R_d поверхностного разряда по керамике. Таким путем можно получить длительность световой вспышки $40 \div 50$ нсек. при общей энергии разряда в 0.24 дж.

Использование капиллярного разряда с целью получения коротких световых вспышек в воздухе показало, что охлаждение плазмы в момент заполнения капилляра не успевает компенсироваться дальнейшим поступлением энергии, что приводит к значительному росту сопротивления канала и таким образом к медленному выделению энергии.

Использование разряда длинной линии для выделения коротких импульсов энергии в разрядном промежутке едва ли целесообразно, так как для согласования линии в искровой стадии (в воздухе ее длительность соответствует примерно 30 нсек.) необходимо вводить большое добавочное сопротивление, равное волновому. Разряд линии на несогласованную нагрузку при длительностях 10^{-7} – 10^{-8} сек. можно рассматривать как разряд обычного конденсатора.

3. Искровой разряд в аргоне, азоте и гелии

Искровой разряд в этих газах исследовался при давлении до $15 \div 20$ атм., напряжении до 20 кв, емкости $C=900$ пф и индуктивности $L=7$ нгн. Экспериментальные данные показывают, что в аргоне при энергиях, боль-

ших 0.01 дж, длительность световой вспышки определяется главным образом послесвечением нагретого газа, причем при энергии 0.01 дж эта

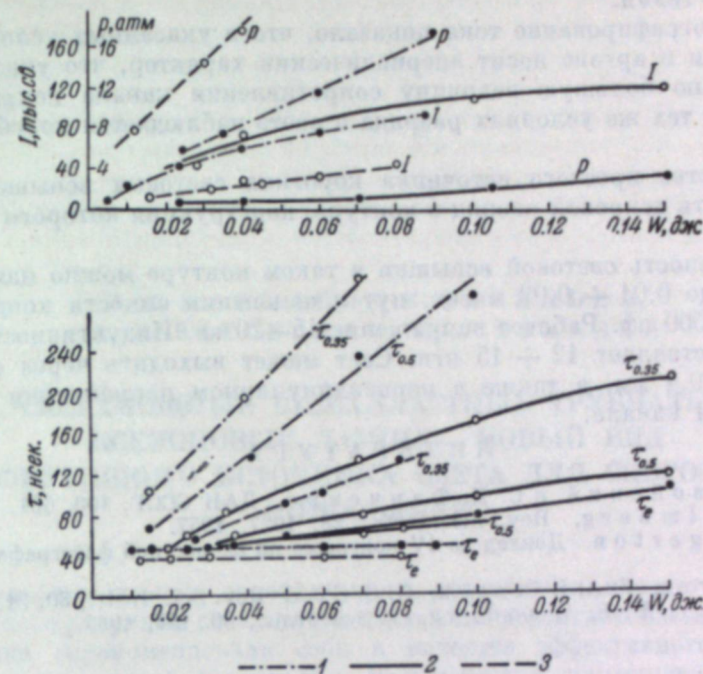


Рис. 4. Зависимость длительности электрических импульсов, амплитуды силы света и длительности световых вспышек от энергии, выделяющейся в искровом разряде, осуществляемом в различных газах.

τ_e — длительность электрического импульса на уровне 0.35 от максимума; $\tau_{0.35}$ и $\tau_{0.5}$ — длительность светового импульса, измеренного на уровне 0.35 и 0.5 от максимума соответственно; I — амплитудное значение силы света; P — давление газа, при котором происходит разряд с энергией W . Параметры разряда: $C=900$ пф, $L=7$ нгн, $l=1.5$ мм. 1 — аргон; 2 — азот; 3 — гелий.

длительность равна $100 \div 120$ нсек. Таким образом, в аргоне при рассмотренном интервале давлений нельзя получить световые вспышки короче 10^{-7} сек. при энергиях разряда больших 10^{-2} дж.

При искровом разряде в азоте и гелии параметры разрядного контура, определяющие длительность электрического процесса, оказывают значительное влияние, так как послесвечение в этих газах мало. На рис. 4 приведены экспериментальные данные относительно интенсивности и длительности световых вспышек искрового разряда в аргоне, азоте и гелии при различных энергиях разряда.

Энергия разряда изменялась путем изменения напряжения на разрядном конденсаторе. Наиболее интенсивные световые вспышки длительностью 100 нсек. можно получить с помощью искрового разряда в азоте.

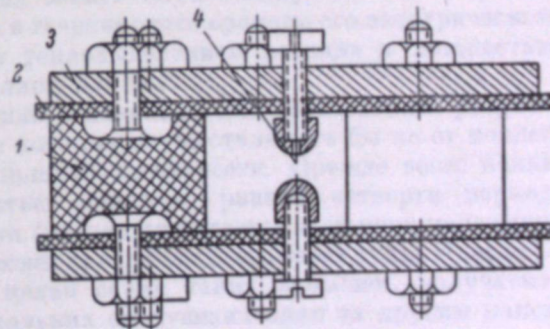


Рис. 5. Простой источник коротких световых вспышек с 5 конденсаторами типа КВБ.

1 — конденсаторы; 2 — прокладки из фторопласта; 3 — латунный диск; 4 — разрядный промежуток.

Интенсивность этих вспышек примерно в $2 \div 3$ раза больше интенсивности вспышек той же длительности, получаемых при искровом разряде в аргоне и гелии.

Осциллографирование тока показало, что в указанных условиях разряд в гелии и аргоне носит аperiодический характер, что указывает на сравнительно большую величину сопротивления канала искры в этих газах. При тех же условиях разряда в азоте наблюдается колебательный характер.

В качестве простого источника коротких световых вспышек можно использовать искровой разряд в контуре, конструкция которого показана на рис. 5.

Длительность световой вспышки в таком контуре можно изменять от $0.1 \div 0.2$ до $0.01 \div 0.03$ мксек. путем изменения емкости конденсатора от 6000 до 500 пф. Рабочее напряжение 15—20 кв. Индуктивность такого контура составляет $12 \div 15$ нгн. Свет может выходить через отверстие диаметром 0.4 мм, а также в перпендикулярном направлении от всего светящегося канала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. К. Завойский и С. Д. Фанченко, ДАН СССР, 100, 661, 1955.
2. I. H. Malmberg, Rev. Sci. Instr., 28, 1027, 1957.
3. H. E. Edgerton. Доклад на IV конгрессе по скоростной фотографии, Кельн, 1959.
4. Q. A. Kerns, F. A. Kirsten, G. C. Cox, Rev. Sci. Instr., 30, 31, 1959.
5. G. Porter, E. R. Wooding, I. Sci. Instr., 36, 147, 1959.

И. С. МАРШАК, В. И. ВАСИЛЬЕВ,
А. Л. ВАССЕРМАН, И. Л. ТОХАДЗЕ

СВЕРХМОЩНЫЕ БЕЗБАЛЛАСТНЫЕ ТРУБЧАТЫЕ КСЕНОНОВЫЕ ЛАМПЫ — НОВЫЙ ВИД ЭФФЕКТИВНОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА ДЛЯ СКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ

Импульсные лампы, основанные на применении квазистационарного импульсного разряда в газе с плотностью тока, достигшей насыщения [1, 2], достаточно зарекомендовали себя в качестве эффективного источника света для скоростной фотографии. Как известно, длительность разряда, а значит и свечения, у трубчатых импульсных ламп зависит от их почти постоянного сопротивления и емкости накопительного конденсатора. Увеличивая эту емкость или составляя целый контур из нескольких звеньев конденсаторов и индуктивностей, можно сильно затянуть свечение и добиться его почти П-образной временной характеристики [3—5], обеспечивающей общую продолжительность освещения до нескольких микросекунд.

Обеспечение импульсными лампами большей продолжительности освещения вызывает трудности из-за непомерного увеличения числа конденсаторов и индуктивностей. Вместе с тем из самой физической природы квазистационарного импульсного разряда не вытекает подобного ограничения. Напротив, такой разряд может быть затянута на сколь угодно большое время при обеспечении в течение этого времени его электрического питания и соответствия между тепловыделением разряда и мощностью, которую способен рассеять баллон лампы.

Это обстоятельство послужило основанием для проведения разработок импульсных ламп, питание которых осуществлялось бы не от конденсатора, а непосредственно от мощной электросети. Прежде всего появились лампы [6] с длительностью вспышки, равной четверти периода колебаний сетевого напряжения (разряд зажигается в момент максимума напряжения и автоматически гаснет при переходе его через нуль). Иногда [7] для освещения используется целая серия таких вспышек, получаемая при зажигании лампы на нескольких следующих один за другим максимумах напряжения. Для обеспечения автоматического погасания разряда при этом переходе требуется, чтобы диаметр трубки не превышал определенной величины, так как в противном случае газ около оси трубки не успевает деионизоваться.

В дальнейшем появились трубчатые лампы, не называемые импульсными [8—10], в которых используется по существу тот же насыщенный (или почти насыщенный) по плотности тока разряд, не гаснущий при переходе напряжения через нуль именно вследствие задержки деиониза-

ции газа на оси достаточно широких разрядных трубок (в принципе подобные лампы могут питаться также и постоянным током, однако для обеспечения большой долговечности такие лампы должны обладать специальными электродами). Эти лампы благодаря весьма высоким мощностям (до сотни квт) и световой отдаче (до 50 $\frac{\text{лм}}{\text{вт}}$), солнечному спектру и возможности их непосредственного безбалластного включения в электрическую сеть могут в некоторых случаях использоваться при скоростной киносъемке в стационарных режимах.

Экспериментальные данные (рис. 1 и 2) о таких стационарных лампах с различными конструктивными параметрами (внутренний радиус трубки

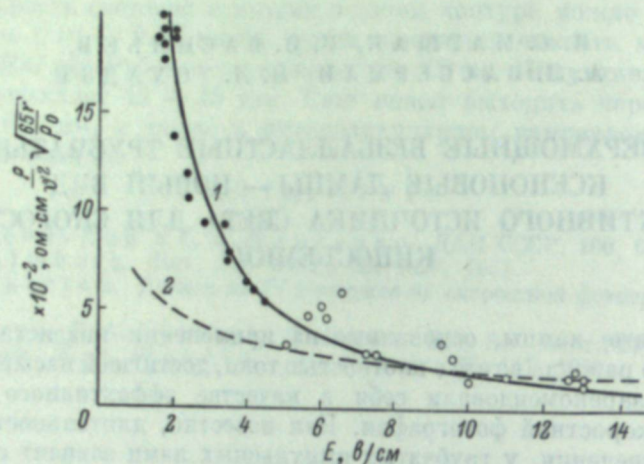


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления ρ от электрического градиента E при различных прочих параметрах ($l = 800$ мм, r от 5 до 25 мм, P_0 от 20 до 160 мм рт. ст.) и различных условиях охлаждения лампы (естественное, принудительное, водяное).

1 — график функции (1); 2 — график функции $\rho = \frac{0.1}{\sqrt{E}}$ ($\epsilon = 1$, $P_0 = 100$ мм рт. ст., $r = 1$ см); кружки — стационарный режим; точки — режим кратковременной перегрузки.

от 3.5 до 25 мм, длина от 100 до 3400 мм, холодное давление ксенона от 45 до 650 мм рт. ст.), работающими при различных условиях питания и охлаждения, можно обобщить следующими эмпирически подобранными зависимостями. (Как видно из рис. 2, при P/l меньше 100 вт (2) должна быть заменена другой зависимостью, приблизительно имеющей вид $\Theta = 30 \log P/l - 34.5$):

$$\frac{\varphi}{\theta^2} = 0.065 \left(\frac{P_0}{rE^3} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

$$\Theta = 19.3 \log \frac{P}{l} - 12. \quad (2)$$

Здесь E — электрический градиент в/см в столбе (равный для длинных ламп величине U/l , где U — напряжение на лампе, l — ее длина); ρ — удельное сопротивление плазмы разряда; θ — отношение радиуса столба разряда к внутреннему радиусу r разрядной трубки (названные величины при достаточно больших l , при которых можно пренебречь приэлектродными падениями напряжения, связаны с сопротивлением R разряда выражением $R = \frac{\rho \theta^2}{\pi r^2} l$), P_0 — «холодное» давление ксенона, Θ — световая отдача лампы, P — рассеиваемая в лампе мощность.

Формула (1) позволяет рассчитать по напряжению питания, длине лампы, диаметру и давлению газа сопротивление лампы, ток в ней и рассеиваемую в ней электрическую мощность, а по формуле (2) рассчиты-

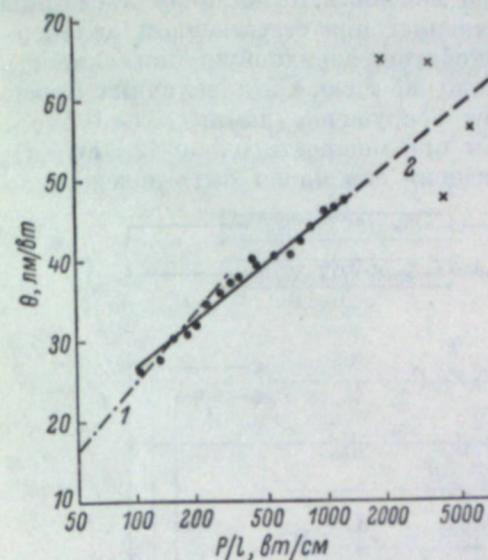


Рис. 2. Зависимость световой отдачи от мощности на единицу длины разряда.

1 — малые значения P/l ; 2 — большие значения P/l ; точки — стационарный режим; крестик — режим кратковременной перегрузки.

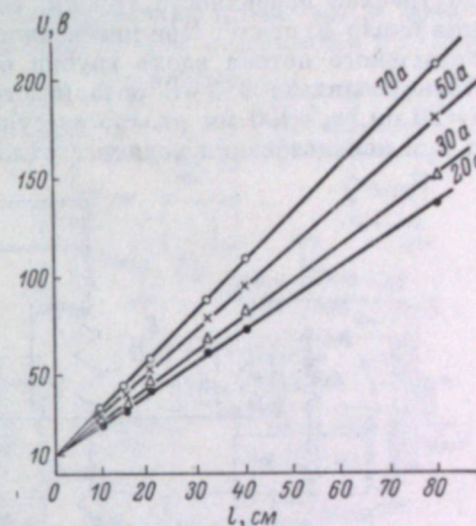


Рис. 3. Зависимость падений напряжения на лампах разной длины при одинаковых значениях силы тока, обозначенных в амперах над графиками ($r = 1$ см, $P_0 = 80$ мм рт. ст.). Отрезок, отсекаемый на оси ординат, можно приравнять сумме приэлектродных падений напряжения.

ваются световые характеристики лампы. Для полного расчета ламп разной длины, работающих при различных условиях охлаждения, к этим формулам следует присовокупить данные о приэлектродных падениях

Характеристики ксеноновых трубчатых ламп непрерывного горения

Мощность, квт	Напряжение питания, в	Сила тока, а	Световая отдача, лм/вт	r , см	l , см	P_0 , мм рт. ст.	Габаритная длина, мм	Охлаждение	Примечания
100	380	260	46	1.2	95	80	1430	Водяное.	Водяная рубашка $\varnothing 44$ мм, потребление воды 40 л/мин.
20	380	56	30	1.1	168	75	1980	Естественное.	Тип ДКСТ 20000.
10	220	46	28	1.1	95	90	1250	То же.	—
6	220	30	38	0.35	25	400	530	Водяное.	Водяная рубашка $\varnothing 24$ мм, потребление воды 4—6 л/мин.
6	110	57	21	1.1	45	60	750	Естественное.	—

напряжения и о допустимой рассеиваемой мощности. Как видно из рис. 3, полученного путем измерения полных падений напряжения на лампах различной длины с одинаковыми прочими параметрами (применявшаяся методика была аналогична методике оценки приэлектродных падений

в импульсных лампах [11]), сумма приэлектродных падений в значительном диапазоне изменения параметров составляет почти одинаковую величину порядка 10 в. Проверка ламп при длительной работе показала, что допустимая рассеиваемая в лампе мощность, отнесенная к единице внутренней поверхности трубки, составляет при естественном охлаждении около 20 Вт/см². При интенсивном обдуве разрядной трубки (скорость воздушного потока вдоль трубки около 40 м/сек.) эта величина может быть увеличена в 2—3 раза (быстрое разрушение лампы с $r=0.5$ см, $l=20$ см, $p_0=100$ мм рт. ст. наступает при мощности около 120 Вт/см²), а при использовании водяного охлаждения она может быть доведена до

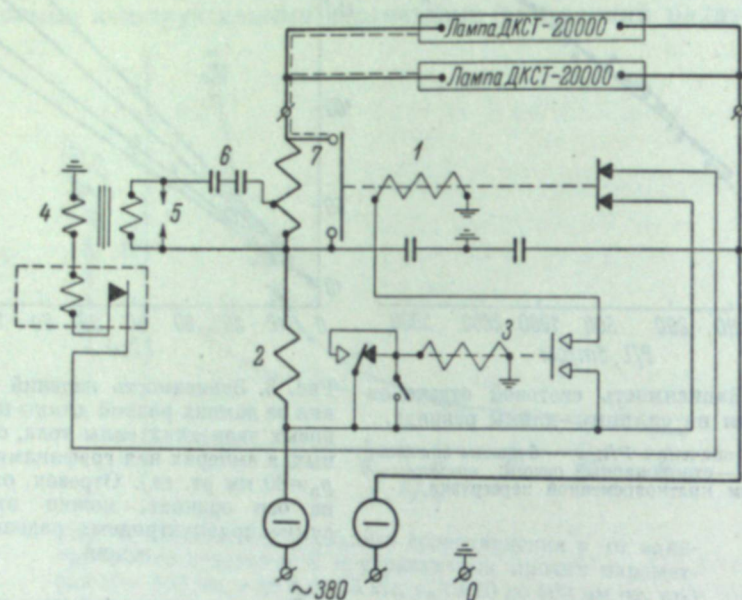


Рис. 4. Принципиальная схема пускового устройства для зажигания безбалластных трубчатых ксеноновых ламп переменного тока.

1 и 2 — магнитные пускатели; 3 — реле времени; 4 — повышающий трансформатор; 5 — разрядник; 6 — конденсатор; 7 — импульсный трансформатор.

300 Вт/см² для коротких (200÷300 мм) и до 140 Вт/см² для длинных (около 1 м) ламп.

В таблице в качестве примеров приведены характеристики нескольких серийных и экспериментальных трубчатых ламп при их работе в длительном режиме непрерывного горения.

Все эти лампы питаются непосредственно от сети переменного тока без балласта. Коэффициент мощности ламп практически равен 1. Зажигание их осуществляется с помощью одностипного для всех ламп пускового устройства, которое автоматически выключается после возникновения разряда. Принципиальная схема такого устройства изображена на рис. 4 и 5. Устройство позволяет зажигать две последовательно включенные лампы с рабочим напряжением 110 в, а также обеспечивает автоматическое зажигание резервной лампы, включенной параллельно основной, в случае внезапного выхода из строя последней.

Особенный интерес для скоростной съемки представляют трубчатые лампы, работающие в промежуточном режиме между режимом импульсных ламп конденсаторного питания и режимом стационарных ламп сетевого питания. Такой промежуточный режим может быть обеспечен при питании ламп второго типа от сети с напряжением, значительно превышающем их номинальное рабочее напряжение, с включением их на перегрузку

с помощью контактора, кратковременно закорачивающего последовательно включенный балласт (рис. 6). Расчетная оценка максимальной кратковременной перегрузки ламп может быть произведена двумя способами.

Можно исходить из упрощенного предположения о том, что за время перегрузки все тепловыделение разряда (около 40% подведенной к лампе энергии [10]) полностью аккумулируется стенками трубки и распределяется в них равномерно по всей толщине. При этом мы пренебрегаем рассеянием тепла стенками в окружающее пространство. Такой подход позволяет получить для предельной мощности P разряда, отнесенной к единице внутренней поверхности трубки S , выражение:

$$\frac{P}{S} = \frac{\chi \delta d T}{(1 - \eta) \tau} \quad (3)$$

Здесь δ и χ — плотность и теплоемкость материала стенки (для кварца соответственно 2.2 г/см³ и 1 Дж/г·град.); d — толщина стенки (обычно 0.2 см); η — КПД разряда как источника излучения (порядка 0.6); τ — длительность работы лампы в перегруженном режиме; T — допустимый перегрев стенки в °С по отношению к температуре стенки при работе лампы в стационарном режиме (до закорачивания балласта). Принимая ориентировочно $T=1000^\circ\text{C}$ и подставляя остальные численные значения величин, находим из (3):

$$\frac{P}{S} = \frac{1100}{\tau} \text{ Вт/см}^2. \quad (4)$$

Другая оценка может быть получена на основе данных о предельных нагрузках трубчатых импульсных ламп [1, 12], согласно которым разрушение этих ламп наступает при превышении значений напряжения питания U или емкости питающего конденсатора C , определяемых соотношением

$$\frac{CU^4}{I^3} = K. \quad (5)$$

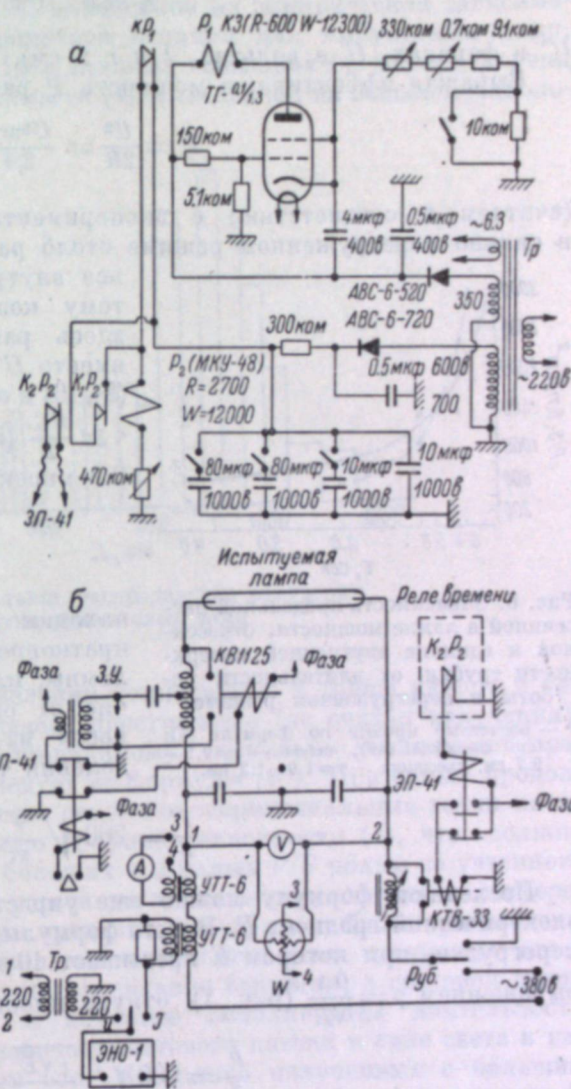


Рис. 5. Принципиальная схема устройства кратковременного включения трубчатых ламп в режим значительной перегрузки.

а — блок управления временем перегрузки; б — блок питания лампы.

Величина K слабо зависит от ряда параметров (род и давление газа, интервал между вспышками, толщина стенки) и сильно — от материала стенок трубки, а для кварцевых трубок также и от их радиуса. При внутренних радиусах трубок от 1 до 7 мм для этой величины можно приближенно принять [1, 12]:

$$K = 8 \cdot 10^6 r \quad (6)$$

(C в фарадах, U в вольтах, l и r в см).

Выражая эффективную мощность P разряда в лампе в виде

$$P = \frac{U^2}{2R} = \frac{U^2 \pi r^2}{2 \rho l} \quad (7)$$

(считаем в соответствии с экспериментальными наблюдениями, что в сильно перегруженном режиме столб разряда практически заполняет

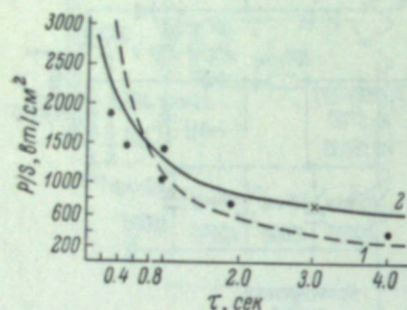


Рис. 6. Зависимость предельной рассеянной в лампе мощности, отнесенной к единице внутренней поверхности трубки, от длительности работы в перегрузочном режиме.

1 — расчетные кривые по формуле (4); 2 — по формуле (10); точки — $r=0.5-0.7$ см; крестики — $r=1.0-1.2$ см.

все внутреннее сечение трубки и потому коэффициент ϑ , учтенный в (1), здесь равен 1) и подставляя сюда вместо U^2 выражение, вытекающее из (5), (6) и оценки длительности вспышки $\tau \cong \frac{RC}{2}$ (справедливый для τ больше 0.5 мксек. [13]):

$$U^2 = \frac{2000}{\sqrt{\pi}} \frac{l^2 r^{1/2}}{r^{1/2} \tau^{1/2}}, \quad (8)$$

находим вторую оценку предельной кратковременной нагрузки трубчатой лампы, как-то учитывающую в отличие от оценки (4) ограничение мощности из-за неравномерности распределения температуры в толще стенки:

$$\frac{P}{S} = 280 \sqrt{\frac{r}{\rho \tau}}. \quad (9)$$

Последнюю формулу можно еще упростить, если выразить ρ через электрический градиент E . Вместо формулы (1) для режима значительной перегрузки, при котором E превышает 10 в/см, можно [2] пользоваться выражением $\rho = \frac{0.1}{\sqrt{E}}$ (рис. 1), откуда вместо (9) получаем

$$\frac{P}{S} = 900 \sqrt{\frac{r \sqrt{E}}{\tau}} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}. \quad (10)$$

Легко видеть, что при $r \cong 1$ см, $E \cong 10$ в/см и $\tau \cong 1$ сек. оценки (10) и (4) дают почти одинаковые величины. Однако из (10) и в отличие от (4) вытекает более медленное изменение предельной мощности с τ , а также некоторая зависимость ее от радиуса трубки и весьма слабая — от электрического градиента. Экспериментальные результаты определения предельных нагрузок, полученные при испытании нескольких десятков ламп с r от 0.05 до 1.2 см, l от 20 до 65 см, p_0 от 50 до 150 мм рт. ст., представленные на рис. 6 (некоторые точки, полученные при осциллографическом определении электрических характеристик, показаны на рис. 1). При испытаниях лампы работали сериями по 10—30 вспышек, следующих одна за другой с интервалами 30 сек., причем режим подбирался таким, чтобы в течение серии наступило размягчение и искривление формы трубки.

В промежутки между вспышками лампы горели в стационарном режиме с нагрузкой порядка 10—20 Вт/см², соответствующей температуре стенки трубки 650—800° С [9].

Как видно из рис. 6, эксперимент удовлетворительно согласуется с расчетными оценками предельной нагрузки, причем, как и следовало ожидать, при коротких вспышках ($\tau < 1$ сек.) экспериментальные точки лучше следуют зависимости (10), выведенной из эмпирической зависимости предельной нагрузки параметров питания для импульсных ламп, питающихся от конденсатора. При длинных вспышках ($\tau > 1$ сек.) точки укладываются на график зависимости (4), выведенной на основе предполо-

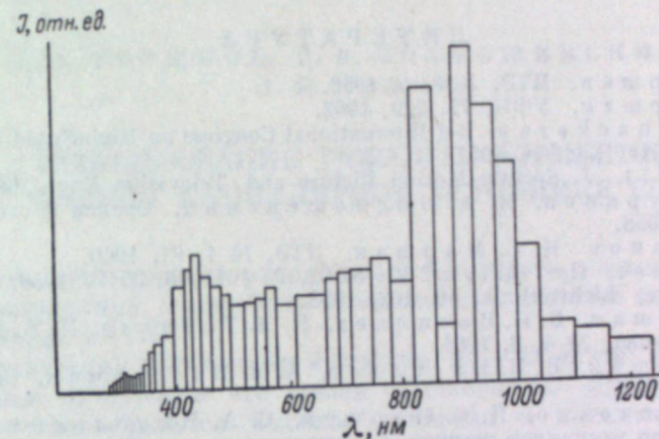


Рис. 7. Спектральное распределение излучения трубчатых ксеноновых ламп.

жения об однородном распределении температуры в толще кварца и без учета потерь тепла в окружающее пространство (не считая излучения). Увеличение радиуса трубки, по-видимому, несколько увеличивает предельную нагрузку, как это следует из формулы (10). При самых продолжительных вспышках (несколько секунд экспериментальные точки начинают ложиться несколько выше графика зависимости (4), что, должно быть, связано с заметной при больших τ и малых P/S ролью не учтенного при выводе этой зависимости рассеяния тепла в окружающей атмосфере.

В ходе испытания ламп при предельных нагрузках были произведены весьма приближенные измерения световой отдачи ламп; с помощью интегрального свечемера измерялось освещивание вспышки, а световой поток определялся по измеренной с помощью осциллографа длительности вспышки и известного [9] отношения светового потока к силе света в направлении, перпендикулярном оси. Несколько полученных с большим разбросом экспериментальных точек нанесены на график зависимости Θ от P/l на рис. 2. Как видно из этого рисунка, точки группируются вокруг продолжения прямой, изображающей функцию (2), что позволяет предположить возможность экстраполяции этой функции на значения P/l до нескольких кВт/см и считать, что в режимах весьма кратковременных перегрузок ($\tau \leq 1$ сек.) световая отдача ламп может достигать до $\sim 60 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}}$.

Таким образом, лампы сравнительно небольших размеров (длина ~ 30 см, диаметр ~ 2 см) могут обеспечить при длительности вспышки ~ 1 сек., соответствующей многим задачам скоростной киносъемки, световой поток более 10 млн лм при мгновенной мощности порядка 180 кВт и напряжении питания 380 в.

В заключение на рис. 7 представлено спектральное распределение излучения безбалластных трубчатых ксеноновых ламп непрерывного

горения, которое, в соответствии с данными о спектральном распределении трубчатых ксеноновых импульсных ламп [14, 15], практически не меняется в широком диапазоне варьирования их конструктивных данных и режимов питания. Как видно из этого рисунка, в видимой области спектр является сплошным и весьма близок к спектру солнечного излучения, благодаря чему лампы обеспечивают весьма правильную цветопередачу при съемке на цветную пленку.

Авторы выражают глубокую благодарность Н. В. Рогатину, В. А. Суворову, Т. М. Горю, И. П. Орехову, В. Б. Миленину и другим товарищам, принимавшим большое участие в проведении описанной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Маршак, ПТЭ, № 3, 5, 1962.
2. И. С. Маршак, УФН, 77, 229, 1962.
3. D. P. C. Thackeray, 3-d International Congress on High-Speed Photography, Butterworth, London, 1957.
4. W. Griffith, J. Society Motion Picture and Television Eng., 66, 127, 1957.
5. Н. Н. Огурцова, И. А. Подмошенский, Оптика и спектроскопия, 4, 539, 1958.
6. В. П. Иванов, И. С. Маршак, ПТЭ, № 1, 92, 1960.
7. H. Vegaue, Пат. ФРГ, кл. 21, 84/02, № 1019008, 30 IV 1958.
8. A. Lompe, Lichttechnik, 10, 108, 1958.
9. И. С. Маршак, В. И. Васильев, И. Л. Тохадзе, Н. В. Рогатин, Светотехника, № 4, 8, 1961.
10. И. С. Маршак, В. И. Васильев, А. Л. Вассерман, Светотехника, № 3, 7, 1962.
11. Р. Г. Вдовченко, И. С. Маршак, С. А. Никольская, Сб. материалов по вакуумной технике, Госэнергоиздат, вып. 21, стр. 17, 1959.
12. В. И. Васильев, И. С. Маршак, сб. материалов по вакуумной технике, Госэнергоиздат, вып. 14, стр. 19, 1958.
13. В. И. Васильев, М. С. Левчук, И. С. Маршак, Оптика и спектроскопия, 11, 118, 1961.
14. Б. М. Водоватов, М. И. Эпштейн, УНФ, VI, 35, 1959.
15. В. П. Кирсанов, И. С. Маршак, М. И. Эпштейн, Оптика и спектроскопия, 13, 146, 1962.

В. А. ГОРШКОВ, И. В. ПОДМОШЕНСКИЙ,
Л. В. ПОПОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МОЩНОМ КАПИЛЛЯРНОМ ИСТОЧНИКЕ СВЕТА

Мощный электрический разряд, канал которого жестко локализован стенками капилляра, может быть использован в качестве источника света высокой яркости [1, 2].

При подведении в капилляр мощности 10^6 — 10^7 Вт/см² наступает бурное тепловое разрушение его стенок со скоростью ≈ 30 см/сек. В капилляре устанавливаются высокое давление и высокая температура, разряд сопровождается истечением плазменных струй (факелов) через открытые торцы капилляра. В источнике света ЭБ-39, например, давление в капилляре равно 450—500 атм., а температура достигает 40 000° К. При таких параметрах в плазме устанавливается полная однократная и частично двукратная ионизация атомов.

При разряде через открытый с торцов капилляр подводимая энергия расходуется на нагрев и испарение материала стенки и на увеличение теплосодержания образующихся паров (ионизация атомов, сообщение частицам кинетической энергии). В балансе расходования энергии последние два вида потерь играют доминирующую роль.

Для получения в источнике сплошного спектра излучения необходимо, чтобы он обладал большим коэффициентом непрерывного поглощения. При ограниченных размерах источника это означает, что в плазме должны существовать высокие электронные и ионные концентрации N_e и N_i . По этой причине в капилляре приходится поддерживать достаточно большое давление. Если не изменять геометрию капилляра, то устанавливаемая величина давления зависит, с одной стороны, от мощности, выделяемой в капилляре, а с другой — от скорости истечения плазмы из капилляра. Истечение струй плазмы на выходе капилляра происходит со скоростью, близкой к скорости звука в газе при температуре плазмы.

Скорость звука в газе v_0 определяется известной формулой

$$v_0 = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}, \quad (1)$$

где γ — показатель политропы, R — газовая постоянная, T — температура плазмы, M — средний атомный вес плазмы (с учетом всех частиц, включая электроны).

Соотношение (1) показывает, что при увеличении атомного веса элементов, входящих в состав плазмы, скорость распространения звука в плазме, а следовательно, и скорость истечения факела будут уменьшаться.

В источнике света ЭВ-39, например, при разряде через текстолитовый капилляр скорость истечения плазмы составляет 12 км/сек. Средний атомный вес элементов, входящих в состав текстолита, равен 7. Если перейти к капилляру, стенка которого будет состоять из элементов с атомным весом порядка 100—200, то при одинаковой температуре скорость истечения такой «тяжелой» плазмы будет 2—3 км/сек. Естественно, что уменьшение скорости истечения тяжелой плазмы приведет к уменьшению расхода плазмы и давление в таком капилляре повысится. Если исходить из представления о насыщении яркости капилляра, то в капиллярах из тяжелых элементов насыщение будет достигаться при меньших длинах, чем в капиллярах, состоящих из легких элементов.

В пользу применения тяжелых элементов говорит и то обстоятельство, что излучательная способность электрического разряда в газах обычно повышается при увеличении атомного веса светящегося газа. Практически это нашло применение при конструировании газоразрядных источников света, в которых используется тяжелый инертный газ ксенон.

В настоящей работе делается попытка оценить возможности и перспективы применения тяжелых атомов в мощном капиллярном источнике света.

Выбор элементов определялся следующими соображениями. Стенка капилляра, в котором производится разряд, во избежание шунтировки разряда не должна проводить электрический ток. Желательно, чтобы тяжелые атомы не имели богатого линейчатого спектра в видимой и ультрафиолетовой области, так как излучение выходит через вылетающие из капилляра факелы, в холодных слоях которого может возникнуть значительное линейчатое поглощение, ослабляющее излучение капилляра.

Изучению подверглись элементы с большим атомным номером: Cd, Tl, I, Br, входящие в состав солей TlBr, CdI₂, TlI. Удобным для экспериментирования оказался монокристалл KPC-5, содержащий соединения TlI и TlBr примерно в одинаковом соотношении по весу. Кроме этих элементов, обследовался стеклообразный Se и в одном специальном случае — Pb.

Из перечисленных веществ изготавливались капилляры длиной 3 ÷ 4 мм и диаметром 2 ÷ 3 мм. Электрический разряд через капилляр производился от искусственной LC — линии источника света ЭВ-39. Первые опыты с капиллярами, изготовленными из CdI₂, TlI, KPC-5, были поставлены с целью проверки положения, высказанного выше. Для этого сравнивались яркость тела свечения капиллярных разрядов, ограниченных стенками, содержащими указанные выше тяжелые элементы, и стенками, содержащими легкие элементы. В последнем случае капилляр изготавливался из текстолита, при испарении которого должен выделяться водород, кислород, углерод.

Спектральная яркость излучения капилляров обоих типов оценивалась фотометрированием соответствующих спектров.

Сравнение яркости излучения тяжелой и легкой плазмы показало преимущество плазмы, состоящей из тяжелых атомов. В качестве примера приведем данные для капилляров CdI₂ и KPC-5, сплошное излучение которых в области 3000 Å имеет яркостную температуру в 4—6 раз большую, чем при разряде в текстолитовом капилляре.

Для выяснения соотношения между поглощательной способностью плазмы, состоящей из тяжелых и легких атомов, следовало создать такие условия, при которых давление и температура были бы одинаковы как для легких, так и для тяжелых атомов. Такие условия обеспечиваются в составном капилляре.

На рис. 1 изображен капилляр из текстолита, в стенку которого врезана вставка из KPC-5 в виде полоски, занимающей 1/3 всей поверхности.

К ст. С. И. Андреева и др.,
стр. 155.

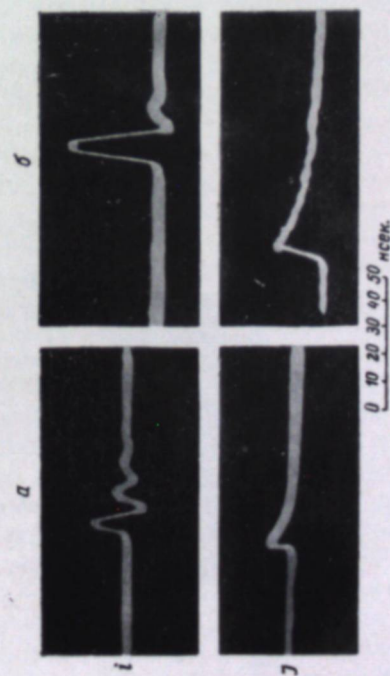


Рис. 3. Осциллограммы силы тока i и силы света I искрового разряда в воздухе для двух режимов разряда. Режимы: а — $U_0 = 6$ кВ, $W = 0,01$ Дж, $t = 1,2$ мм, $C = 500$ пФ, б — $U_0 = 23$ кВ, $W = 0,11$ Дж, $t = 10$ мм, $C = 500$ пФ.

К ст. А. А. Воробьева
и др., стр. 171.



Рис. 2. Фотография изображения «фокусного пятна» бетатрона.

К ст. В. А. Горишкова и др.,
стр. 169.

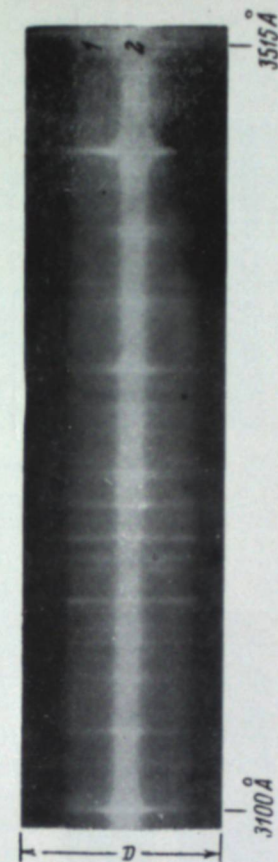


Рис. 2. Распределение спектральной яркости по диаметру составного капилляра. Ориентировка щели спектрографа показана на рис. 1. а — диаметр капилляра, б — зона легких атомов; 2 — зона тяжелых атомов.

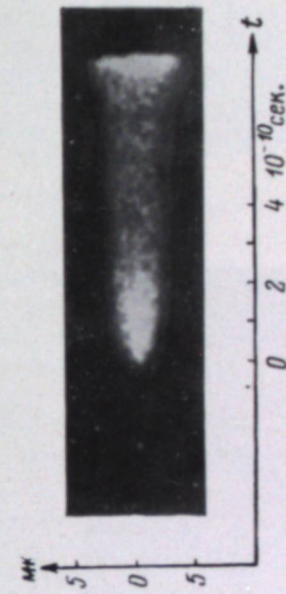


Рис. 8. Расширение канала искры в азоте при начальном давлении 23 атм. (разрядный контур рис. 7, а).

К ст. В. Ф. Болотина
и др., стр. 180.

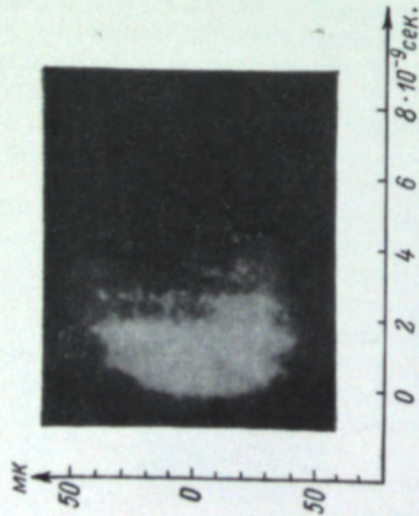


Рис. 9. Расширение канала искры в вакууме при начальном давлении 20 атм. (разрядный контур рис. 7, б).



Рис. 10. Расширение канала искры в кислороде при начальном давлении 10 атм. (разрядный контур рис. 7, в).

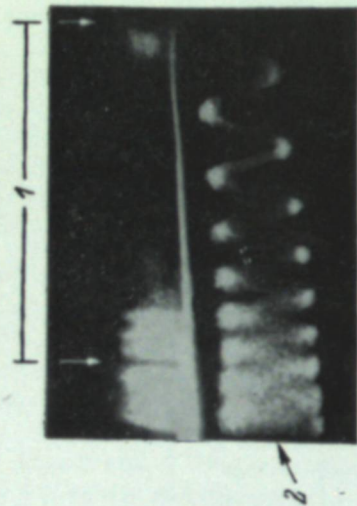


Рис. 12. Наблюдение магнито-звукового резонанса в плазме.

1 — развертка свечения плазмы; 2 — метки времени (период синусоиды 0.5 мсек.).

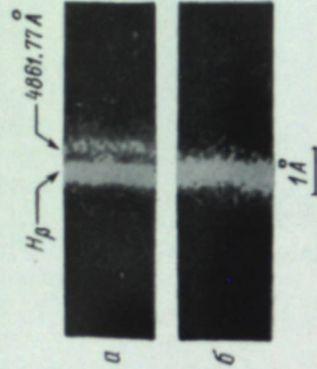


Рис. 14. Фотографии спектральных линий, полученные с помощью электронно-оптического преобразователя.

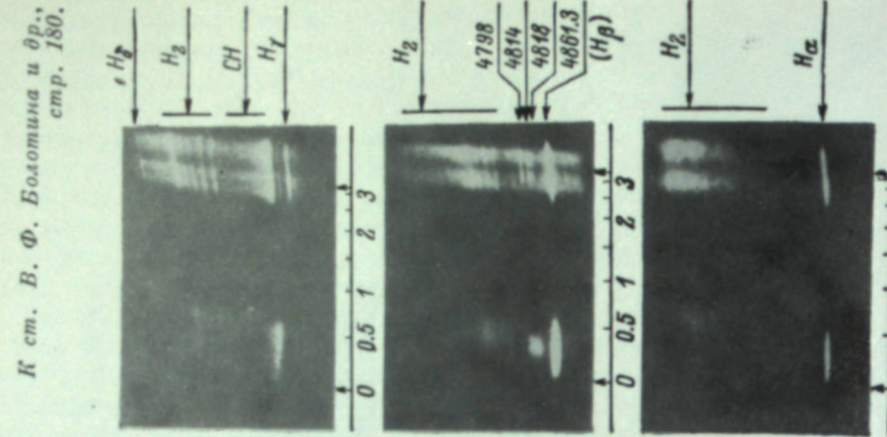


Рис. 13. Временная развертка спектра свечения плазмы.

Р. ст. В. Ф. Болотина и др., стр. 180.

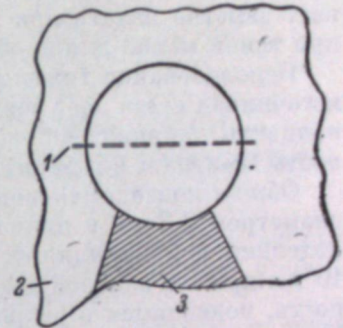


Рис. 1. Капилляр для измерения относительной излучательной способности легких и тяжелых атомов (вид с торца).

1 — положение щели спектрографа на изображении капилляра; 2 — текстолит; 3 — КРС-5.

Рассмотрение спектров показывает, что в таком капилляре достигается пространственное разделение легких и тяжелых атомов.

На рис. 2 (см. вклейку, стр. 168) приведена спектрограмма, из которой видно, что центральная зона капилляра, заполненная тяжелыми атомами, светится гораздо ярче, чем зоны легкой плазмы.

Можно считать, что и легкая, и тяжелая плазма находятся при одинаковых температуре и давлении. Этому способствуют малые размеры зоны тяжелых атомов, высокая теплопроводность и скорость звука в плазме. Сопоставление яркостей сплошного фона этих двух зон капилляра показывает, что излучательная способность тяжелых атомов выше, чем легких, в несколько раз. Аналогичные опыты с другими элементами (например, Se и Pb) неизменно обнаруживали повышенную излучательную способность тяжелых элементов по сравнению с легкими.

Для выяснения эффекта повышения давления в капилляре при наличии тяжелых атомов спектр излучения составного капилляра, о котором шла речь выше, сравнивался со спектром излучения текстолитового капилляра такой же геометрической конфигурации. На спектрограммах видно, что некоторые линии, принадлежащие легким атомам, например линии ионов СП и СШ, в присутствии тяжелых атомов уширяются. Уширение линий указывает на повышение давления в капилляре. Объяснение этому можно найти в том, что тяжелые атомы занимают часть объема капилляра и уменьшают сечение для выхода плазмы. В данном случае сечение капилляра уменьшается по крайней мере в 1.5 раза по сравнению с капилляром, не содержащим тяжелых атомов.

Порядок давления в капилляре можно определить с удовлетворительной точностью, исходя из газодинамической модели истечения, которая вполне применима к мощному капиллярному разряду.

Можно считать, что истечение плазмы из капилляра соответствует критическому, тогда для секундного расхода G плазмы будет иметь место следующее газодинамическое соотношение:

$$G = \rho_{кр} v_{кр} s_{кр}, \quad (2)$$

где $\rho_{кр}$, $v_{кр}$ — плотность плазмы и скорость истечения плазмы в критическом сечении; $s_{кр}$ — площадь критического сечения.

Формулу (2) можно видоизменить, введя в нее вместо критических величин плотности и скорости истечения величины ρ_0 и v_0 (где v_0 — скорость звука в газе при температуре плазмы), характеризующие состояние плазмы внутри капилляра. Измеряя расход плазмы и температуру плазмы в капилляре, легко вычислить ρ_0 , а следовательно, и давление.

Расчет, проведенный для капилляра из КРС-5 длиной 4 мм и диаметром 2.2 мм, позволил оценить величину давления, которая оказалась равной 560 атм. Этот расчет относится к электрическому режиму, при котором ток через капилляр равен 10 000 а. Напомним, что для достижения указанного выше давления в текстолитовом капилляре необходима длина капилляра 10 мм.

При разряде в текстолитовом капилляре длиной 10 мм имеет место насыщение яркости до величины, соответствующей измерению абсолютно черного тела при температуре, развиваемой в плазме. Поэтому можно полагать, что для капилляра из КРС-5 длиной 4 мм также имеется насы-

шение излучения, так как в нем плазма находится при столь же высоком давлении и тяжелые атомы обладают существенно большей излучательной способностью. Отсутствие линий на фоне сплошного спектра дополнительно показывает, что данный излучатель действительно является черным телом.

Яркостная температура источника света, использующего тяжелые элементы, определялась сопоставлением его излучения с излучением хорошо обследованного и прокалированного источника света ЭВ-39.

Для капилляра длиной 4 мм, изготовленного из монокристалла КРС-5, при токе порядка 10 000 а яркостная температура в диапазоне длин волн от 4000 Å до 3150 Å оказалась равной 35 000° К. Интересно, что при дальнейшем уменьшении длины капилляра яркость излучения начинает заметно падать при длине порядка 1 мм. Капилляр из текстолита при такой малой длине обнаруживает лишь очень слабый сплошной фон.

Использование тяжелых атомов в мощных импульсных капиллярных источниках света дает возможность за счет уменьшения длины капилляра понизить напряжение разряда, а следовательно, и потребляемую мощность, выиграть в габарите, весе и стоимости источника света.

Общая подводимая мощность для капилляра из монокристалла КРС-5 диаметром 2.2 мм и длиной 1.5—2 мм составляет 50—60% от мощности, подводимой к капилляру из текстолита такого же диаметра, но длиной 10 мм при одинаковой силе тока. Однако удельная мощность, т. е. мощность, подводимая в разряд в единицу объема, для тяжелой плазмы оказывается при малых длинах капилляра больше, чем для легкой плазмы, в 1.5—2 раза.

Выводы

1. Использование тяжелых элементов в мощном капиллярном источнике света приводит к повышению давления в капилляре.
2. Излучательная способность тяжелой плазмы, содержащей атомы Cd, I, Tl, Br, оказывается в 4—6 раз выше, чем для плазмы, которая состоит из H, C, O.
3. Тяжелые атомы позволяют применять капилляры небольшой длины, обеспечивая тем самым источники света, приближающиеся к поверхностным излучателям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson, Astrophysikal Journ., 64, 295, 1926.
2. Н. Н. Огурцова, И. В. Подмошенский, УНФ, VI, 58, 1959.
3. Н. Н. Огурцова, И. В. Подмошенский и М. И. Демидов, Журн. «Оптико-механическая промышленность», № 1, 1960.

А. А. ВОРОБЬЕВ, В. А. МОСКАЛЕВ

ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ СКОРОСТНОЙ СЪЕМКИ НЕКОТОРЫХ ПРОЦЕССОВ

Двухкамерный сильноточный стереобетатрон на 25 Мэв открывает новые возможности для исследования быстротекущих процессов, недоступных для других существующих методов [1].

Стереобетатрон позволяет получать два пучка тормозного излучения, пересекающихся в заданной точке. Пучки могут быть генерированы одновременно или со сдвигом во времени от 0 до 50 мксек.

Длительность импульсов излучения составляет 0.2 мксек. и меньше. Мощность дозы излучения в каждом из 2 пучков значительно увеличена по сравнению с соответствующими дозами существующих бетатронов. В бетатроне ускоряется заряд электронов, равный 10^{-7} кулона, что соответствует ускорению $(5 \div 6) \cdot 10^{11}$ электронов за 1 цикл, тогда как обычные бетатроны ускоряют в среднем $5 \cdot 10^9$ электронов.

Применяя в качестве детектора излучения рентгеновскую пленку «Илфорд» с усиливающими экранами, можно просвечивать за один импульс излучения длительностью 0.2 мксек. блок свинца толщиной 140 мм. Для просвечивания этой же толщины свинца на обычном бетатроне с энергией 30 Мэв при мощности дозы 70—80 рентген/мин. потребовался бы интервал времени $3 \div 5$ сек., т. е. от 150 до 250 импульсов.

При промышленном использовании бетатрона для фотосъемки объектов существенное значение имеют размеры источника излучения («фокусного пятна»), определяющие четкость получаемого фотографического изображения. Размеры «фокусного пятна» стереобетатрона на обеих мишенях были определены путем фотографирования этого пятна специальной фотокамерой, схема которой дана на рис. 1.

Полученные изображения «фокусного пятна» представлены на рис. 2 (см. вклейку, стр. 168), где изображение дано в масштабе $2 \div 1$. Пятна имеют вытянутую в вертикальном направлении форму с размерами около 1×3 мм.

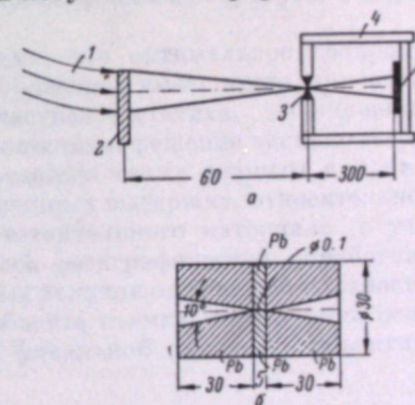


Рис. 1. Методика определения фокусного пятна.

а — схема эксперимента: 1 — электронный пучок, 2 — мишень, 3 — объектив, 4 — фотокамера, 5 — фотопленка; б — размеры объектива (в мм).

Исследования работы стереобетатрона показали, что имеются реальные возможности увеличения ускоряемого заряда в несколько раз, а также сокращения в несколько раз размеров фокусного пятна.

При использовании стереобетатрона для скоростной фотографии возможно получение рентгеновской стереосъемки быстротекущих процессов с длительностью менее 10^{-6} сек., причем эти процессы могут осуществляться в камерах, огражденных стенкой, эквивалентной по толщине слою свинца до 140 мм.

При одновременном генерировании пучков излучения можно получить две последовательные фотографии исследуемого явления с двух точек зрения и с любым интервалом времени между съемкой 1-го и 2-го кадров.

В заключение необходимо отметить, что имеется возможность разработки стереобетатрона, который будет работать в режиме 1000 циклов в секунду.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Москалев и др., Изв. вузов, физ., № 5, 35, 1959.

ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СЪЕМКИ

В. Г. ПЕЛЛЬ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭКСПОНОМЕТРИИ ПРИ СКОРОСТНЫХ КИНОСЪЕМКАХ

Настоящее сообщение ограничивается областью съемки не самосветящихся объектов при освещении источниками непрерывного действия и, таким образом, охватывает в основном киносъемку с относительно низкой частотой, до нескольких сот тысяч кадров в секунду.

Освещение объектов скоростной киносъемки имеет своей задачей, во-первых, получение правильно экспонированного негатива, имеющего оптимальные оптические плотности, и, во-вторых, обеспечение возможности выявления на изображении особенности, формы и структуры поверхностей объекта съемки.

Ранее проведенные работы показывают, что оптимальное воспроизведение мелких деталей объекта на изображении имеет место при оптической плотности соответствующих участков негатива, находящейся в пределах значений от 0.8 до 1.0. Следовательно, решение экспонетрической задачи освещения сводится к созданию таких величин яркостей участков объекта съемки, которые при заданных выдержке, относительном отверстии оптики и свойствах светочувствительного материала (с учетом малой выдержки и влияния условий фотографической обработки), обеспечат получение на негативе указанных величин оптической плотности.

Между величиной яркости участка объекта съемки и величиной освещенности изображения этого участка в фокальной плоскости объектива существует соотношение

$$E_{из} = \frac{\pi B \cdot \cos^4 \theta \cdot K \cdot \tau}{4\bar{n}^2 \left(1 + \frac{1}{m}\right)^2},$$

где $E_{из}$ — освещенность участка изображения в фокальной плоскости (лк); B — яркость участка объекта в направлении объектива киносъемочной камеры (в нт); $\bar{n}$ — знаменатель значения относительно отверстия объектива; θ — угол падения луча в данную точку плоскости светочувствительного слоя; K — коэффициент виньетирования (зависящий от угла θ); τ — коэффициент пропускания объектива; $\frac{1}{m}$ — масштаб изображения.

Яркость (B) участка объекта съемки определяется величиной его освещенности (E) и значением коэффициента яркости (r) в данном направлении; рассеянно отражающие поверхности имеют коэффициент яркости, практически одинаковый для всех направлений и совпадающий по величине с коэффициентом отражения (ρ):

$$B = \frac{rE}{\pi} \quad \text{и} \quad B = \frac{\rho E}{\pi}.$$

Таким образом, при известном коэффициенте отражения (для рассеянно отражающих поверхностей) возможно определение освещенности участка объекта, необходимой для получения заданной освещенности светочувствительного слоя в киносъемочной камере. Это позволяет осуществлять предварительный выбор необходимых осветительных устройств.

Зеркально-отражающие поверхности объектами съемки оказываются сравнительно редко; яркость такой поверхности в направлении зеркально-отраженного луча равна яркости источника света, умноженной на коэффициент отражения поверхности.

При съемке направленно-рассеивающих поверхностей, обычно наиболее часто встречающихся, стремятся так расположить источники света, чтобы направленная составляющая отраженного света не попадала в объектив киносъемочной камеры и изображение объектива строилось в основном лучами рассеянного света. В этом случае яркость поверхности в направлении объектива киносъемочной камеры будет зависеть от ее освещенности и коэффициента отражения; при съемке таких объектов с цилиндрическими и сферическими поверхностями при переднем освещении неизбежно образование ярких бликов (по числу осветительных приборов). При выборе экспозиции в расчете на правильное воспроизведение других, не бликующих участков объекта, детали участков поверхности, занятых бликами, в большинстве случаев на изображении правильно воспроизводиться не будут.

Связь между оптической плотностью почернения негативного изображения и логарифмом экспозиции выражается известной характеристической кривой данного светочувствительного материала. Для заданной оптической плотности из характеристической кривой можно найти экспозицию, а при известной выдержке и освещенности, необходимую для получения этой плотности. Однако следует иметь в виду, что характеристические кривые (и получаемые с их помощью численные значения светочувствительности) строятся на основании испытания светочувствительных материалов в стандартных условиях с использованием сенситометра ФСР-4, экспонирование в котором ведется при выдержке в 0.05 сек. При скоростной киносъемке выдержки являются на несколько порядков более короткими, что ведет к необходимости учета отклонений от закона взаимозаменяемости для каждого конкретного светочувствительного материала при конкретных условиях его обработки.

Отсутствие стандартного сенситометра с соответствующим источником света и затвором заставляет рекомендовать для экспонирования сенситограммы (упрощенного типа) использование самой скоростной киносъемочной камеры; при этом в какой-то степени учитывается также и светорассеяние, которое весьма существенно для малых плотностей.

В большинстве случаев экспониметрический контроль освещения при скоростной киносъемке может осуществляться при помощи фотоэлектрических люксметров или экспониметров, снабженных светорассеивающей насадкой. Как правило, необходимым оказывается расширение диапазона измерений прибора в сторону повышения верхнего предела измеряемой величины до приблизительно 10^7 — 10^8 лк, которое без затруднений осуществляется путем введения нейтральных светопоглощителей.

В отдельных случаях возникает необходимость в измерении яркости малых участков объекта съемки с относительно значительного расстояния. Такое измерение может осуществляться яркомером деталей кадра с малым (1 — 2°) углом охвата, одна из возможных схем которого разработана на Кафедре научной фотографии и кинематографии МГУ.

В. Ф. БОЛОТИН, Б. А. ДЕМИДОВ,
Е. К. ЗАВОЙСКИЙ, Ю. Ф. СКАЧКОВ,
Г. Е. СМОЛКИН, С. Д. ФАНЧЕНКО

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ХРОНОГРАФИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛАЗМЫ

Как было ранее установлено [1, 2] (см. также [3, 4]), многокаскадные электронно-оптические преобразователи (ЭОП) профессора М. М. Бутлова обладают предельным коэффициентом усиления яркости изображения, позволяя регистрировать световые сигналы минимальной интенсивности — отдельные фотоны. Теоретические соображения показали [5] (см. также [3, 4]), что эти приборы могут обеспечить временное разрешение до 10^{-14} сек., причем в опытах по развертке свечения искр [6] было достигнуто временное разрешение $3 \cdot 10^{-12}$ сек. Это позволило создать на основе применения многокаскадных ЭОП установки для электронно-оптической хронографии (т. е. высокоскоростной фоторегистрации), отличающиеся высоким временным разрешением и большой эффективностью использования света.

В настоящем докладе мы кратко рассмотрим принципы действия этих установок и остановимся на результатах исследования с их помощью плазмы.

I. Методика электронно-оптической хронографии

Основным элементом любой установки для электронно-оптической хронографии является многокаскадный ЭОП. Этот прибор [7] состоит

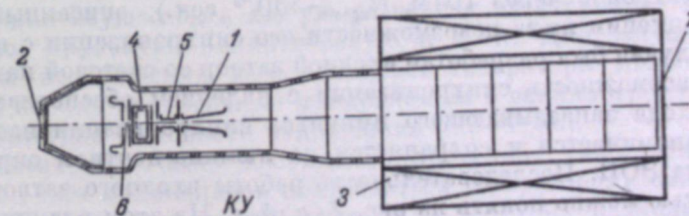


Рис. 1. Схема многокаскадного электронно-оптического преобразователя.

КУ — каскад управления изображением; 1, 6 — затворные пластины; 2 — входной фотокатод; 3 — электромагнит; 4, 5 — пластины для развертки изображения; 7 — выходной люминесцентный экран.

из ряда последовательно соединенных каскадов, каждый из которых представляет собой самостоятельный ЭОП (рис. 1). Входной каскад КУ обычно

используется для управления изображением и снабжается отклоняющей системой, сходной с применяемыми в осциллографических трубках. Последующие каскады выполняют задачу усиления яркости изображения, сформированного входным каскадом. Для фокусировки изображения в каскадах усиления эти каскады помещаются в постоянное магнитное поле, создаваемое электромагнитом 3. Изображение фотографируется с выходного люминесцентного экрана 7 на обычную фотопленку.

1. Питание и синхронизация включения многокаскадных ЭОП

В каждом каскаде многокаскадного ЭОП должна быть осуществлена точная фокусировка электронного изображения. Для обеспечения возможности независимого подбора напряжений каждый каскад питается от отдельной секции высоковольтного выпрямителя или делителя напряжения. В статическом режиме питания многокаскадного ЭОП на его выходном люминесцентном экране, помимо полезного изображения, наблюдается также нежелательное фоновое свечение, обусловленное его собственными электронными «шумами». При исследовании кратковременных физических процессов влияние собственных шумов ЭОП может быть устранено, если вместо постоянного включения всех каскадов осуществить синхронизованное импульсное включение одного или двух входных каскадов (входной электронный затвор) и последнего, выходного каскада (выходной электронный затвор).

а. Входной затвор ЭОП с опережающей синхронизацией

В опытах, где явление возникало в наперед заданный момент времени и где использовался многокаскадный ЭОП с входным каскадом типа ПИМ-3, для импульсного включения входного каскада использовались затворные пластины 1 и 6 этого каскада (рис. 1). К затворным пластинам прикладывалось постоянное начальное смещение ~ 3 кв, достаточное для полного запираания изображения. Незадолго до начала явления на эти пластины подавался прямоугольный отпирающий импульс той же амплитуды, что и начальное смещение, но обратной полярности. Длительность указанного прямоугольного импульса определяла время наблюдения.

б. Входной затвор с памятью

При исследовании случайных процессов, длительность которых меньше задержки, возникающей при прохождении импульсов через современные радиоэлектронные схемы ($\geq 10^{-9} - 10^{-10}$ сек.), а также меньше времени пролета электронов через ПИМ ($t_{\text{прол}} \sim 10^{-9}$ сек.), описанный входной затвор неприменим из-за невозможности его синхронизации с процессом. Для этого случая был разработан входной затвор со световой памятью [8], в котором возможность синхронизации с явлением обеспечивается тем, что до прихода запаздывающего импульса синхронизации изображение процесса запоминается и сохраняется на люминесцентном экране входного каскада ЭОП. Последовательность работы входного затвора со световой памятью можно понять из рис. 2, а, б, в. На этом рисунке заштрихованы те каскады ЭОП, на которых нет ускоряющего напряжения. В исходном состоянии (рис. 2, а) на входном каскаде (каскад управления усиления (заштрихован) ускоряющее напряжение снято. Свечение от изучаемого явления образует на входном фотокатоде световое изображение на люминесцентный экран, где снова преобразуется в световое изображение и запоминается на время высвечивания люминофора. Однако дальше

изображение пройти не может, поскольку первый каскад усиления выключен. Помимо фотокатода ЭОП, свечение от явления попадает также на фотоумножитель, который вырабатывает импульс синхронизации, запускающий электронную схему управления входным затвором. Действие этой схемы, описанной в [8], сводится к тому (рис. 2, б), что на первый каскад усиления импульсно подается нормальное ускоряющее напряжение. Одновременно с входного каскада управления КУ ускоряющее напряжение снимается. В результате этого изображение с экрана теперь проходит на выходной люминесцентный экран многокаскадного ЭОП и фотографируется с него. Через время ~ 100 мксек. восстанавливается исходное состояние (рис. 2, в); входной каскад КУ снова включен в режиме ожидания следующего события, а первый каскад усиления выключен.

в. Выходной затвор ЭОП

В ждущем режиме работы установки ускоряющее напряжение на последний усилительный каскад ЭОП подается лишь в виде прямоугольных импульсов длительностью ~ 0.01 сек. Включение выходного каскада синхронизируется с началом исследуемого события и включением входного затвора. При этом механический затвор фотоаппарата, фотографирующего выходной люминесцентный экран ЭОП, постоянно открыт.

Использование выходного импульсного электронного затвора в ждущем режиме позволяет практически полностью исключить засветку фотопленки собственными шумами промежуточных каскадов ЭОП за время между регистрируемыми событиями.

Если событие возникает в наперед заданный момент времени и используется входной затвор, исключающий влияние собственных шумов входного каскада ЭОП, то удовлетворительные, в смысле малости фона, фотографии процессов могут быть получены и без применения выходного затвора.

2. Временная развертка изображения в ЭОП

Используя отклоняющую систему, имеющуюся во входном каскаде ЭОП, можно осуществить любую развертку электронного изображения: линейную, круговую, эллиптическую и т. п. Для ждущей линейной развертки изображения использовались генераторы пилообразных импульсов, вполне аналогичные применяемым в осциллографах, но с большей амплитудой выходного напряжения (1.5—3 кв).

В опытах, где было необходимо временное разрешение $\sim 10^{-10} - 10^{-11}$ сек., нам приходилось пользоваться генераторами синусоидальных колебаний непрерывного действия. Для этого на радиолампах ГИ-17, ГУ-50 и ГУ-13 было построено несколько генераторов мощностью ~ 100 вт, работавших на частотах 1, 11, 21 и 300 мГц.

Высокочастотное развертывающее напряжение подавалось либо на одну пару пластин ПИМ (прямолинейная развертка), либо на две взаимно перпендикулярные пары пластин ПИМ со сдвигом фаз на $\pi/2$ (круговая развертка). Поскольку работа высокочастотных генераторов никак не синхронизировалась с изучаемыми явлениями, удобнее было пользоваться круговой разверткой, имеющей постоянную скорость во все мо-

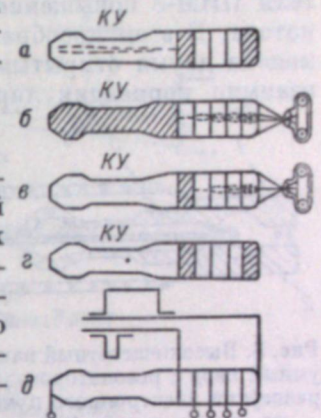


Рис. 2. Цикл работы электронно-оптического преобразователя в ждущем режиме с входным и выходным импульсным электронными затворами.

а — исходное состояние; б — открывание входного и выходного затвора; в — закрывание входного затвора; г — закрывание выходного затвора; д — схема высоковольтного питания электронно-оптического преобразователя.

менты времени. Однако в ряде измерений приходилось пользоваться и прямолинейной разверткой. В этом случае из всех полученных фотографий отбирались лишь те, где начало процесса приходилось на моменты времени, когда скорость развертки была близка к максимальной.

Для исследования возможности дальнейшего повышения временного разрешения электронно-оптической хронографии по сравнению с ранее достигнутым значением $3 \cdot 10^{-12}$ сек. [6] одним из авторов настоящей статьи (С. Д. Фанченко) были проведены специальные опыты. В этих опытах использовался разработанный в лаборатории М. М. Бутслова импульсный преобразователь ПИМ-3В, отличающийся от преобразователя ПИМ-3 повышенной напряженностью электрического поля у фотокатода. В этом преобразователе обычная отклоняющая система была заменена двумя открытыми резонаторами, отклонявшими изображение во взаимно перпендикулярных направлениях. Резонаторы были настроены на длину волны 10 см. Конструкция резонатора вместе с коаксиальным вакуумным вводом для питания резонатора от магнетрона показаны на рис. 3.¹

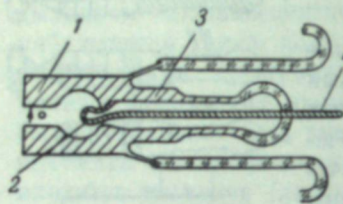


Рис. 3. Высокочастотный вакуумный ввод с резонатором для развертки электронного пучка на длине волны 10 см.

1 — резонатор; 2 — петля связи; 3, 4 — внешний цилиндр и центральный шток коаксиального фидера. Крестиком изображен кроссовер электронного пучка, стрелка показывает направление развертки.

В преобразователе ПИМ-3В была осуществлена эллиптическая развертка изображения с большой полуосью эллипса ≈ 10 мм. Геометрическое разрешение по экрану ПИМ-3В было не хуже 30 линий мм.

Таким образом, на опыте было достигнуто техническое временное разрешение 1.5×10^{-13} сек.

Затем была осуществлена развертка изображения на длине волны 10 см в многокаскадном ЭОП, входным каскадом которого служил ПИМ-3В с резонаторами. В этом опыте было осуществлено временное разрешение

$8 \cdot 10^{-13}$ сек. Развертке подвергались электроны, составляющие многоэлектронную компоненту собственных «шумов» входного фотокатода ЭОП, ранее обнаруженные в работе [1]. Опыт показал, что в составе этой многоэлектронной компоненты шумов есть группы электронов, вылетающие с фотокатода с разбросом по времени менее $8 \cdot 10^{-13}$ сек. Следовательно, физическое временное разрешение ПИМ-3В не хуже этой величины. Из теоретических соображений [4] следует ожидать, что при напряженности поля у катода 9 кв/см физическое временное разрешение ЭОП должно быть $\sim 3 \cdot 10^{-13}$ сек.

Таким образом, проведенный эксперимент подтвердил, что имеется практическая возможность довести временное разрешение электронно-оптической хронографии до нескольких единиц на 10^{-13} сек.

II. Физические исследования плазмы

1. Исследование процессов в плазме искрового разряда

Ранее сообщалось [6] об исследовании электронно-оптическим методом миниатюрных искр в газах. В этих опытах искры возникали при разрядке диполей Лебедева с полной длиной в несколько мм. Длина искры составляла 0.1—0.2 мм, полная длительность разряда $10^{-9} \sim 10^{-10}$ сек., а полное число световых квантов, излучаемых в одной искре, — 10^8 . При этом были обнаружены осцилляции вдоль искрового промежутка своеобразных зон яркого свечения с периодом $\sim 1 \cdot 10^{-10}$ сек.

¹ Первоначальная конструкция резонатора предложена Р. В. Чикиным.

Для проверки того, наблюдаем ли мы в данном случае распространение стримеров в искровом промежутке или же указанные осцилляции происходят в уже сформировавшемся канале искры, двумя из авторов настоящей статьи (Ю. Ф. Скачков и С. Д. Фанченко) был поставлен следующий опыт (рис. 4). Изображение канала искры с помощью полупрозрачного зеркала проецировалось одоновременно на входные фотокатоды двух ЭОП. Во входном каскаде ЭОП-1 производились развертки изображения искры на частоте 300 мГц с временным разрешением $\sim 1 \cdot 10^{-11}$ сек.

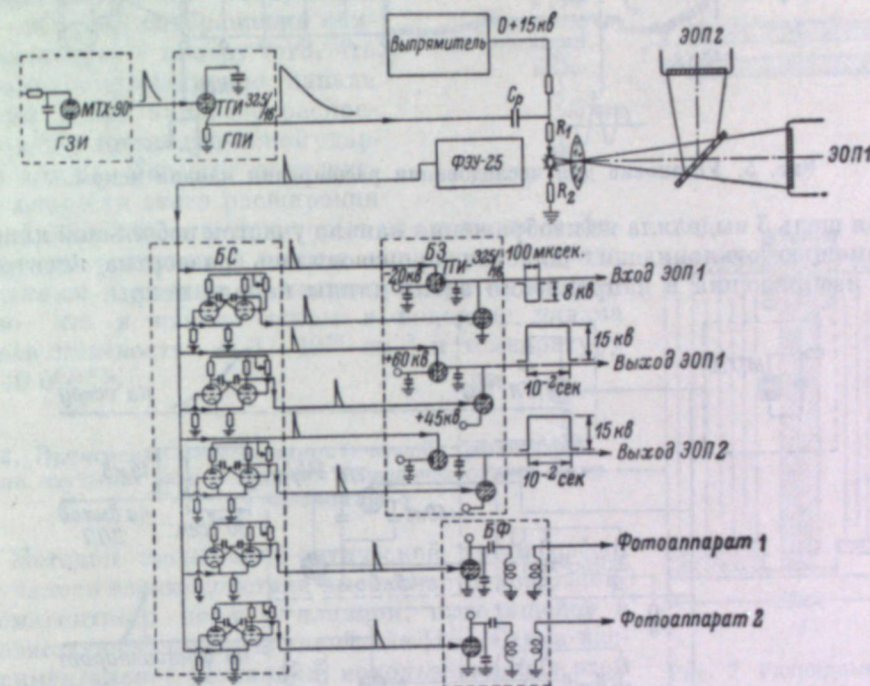


Рис. 4. Блок-схема опыта по сопоставлению статического и развернутого во времени изображения канала искры.

В ЭОП-2 изображение не развертывалось; он служил только для усиления яркости изображения искры, необходимого для фотографирования. Оба многокаскадных ЭОП работали в ждущем режиме, причем ЭОП-1 работал с входным и выходным затворами, а ЭОП-2 только с выходным затвором. На рис. 4 приведена полная блок-схема установки, на которой показана форма и временная последовательность импульсов, управляющих искрой, затворами и фотоаппаратами.

Сопоставление статических и развернутых по времени фотографий показало, что уже через $1 \cdot 10^{-11}$ сек. устанавливается та форма нитевидного изогнутого и изломанного канала разряда, которая сохраняется в течение последующего процесса разряда. Таким образом, наблюдавшиеся ранее осцилляции зон яркого свечения следует приписать именно колебательным процессам в плазме канала искры.

Помимо оптических наблюдений колебаний в плазме искрового канала, определялся спектральный состав электромагнитного излучения искры. При этом между длиной волны наиболее интенсивно излучаемых электромагнитных колебаний и периодом осцилляции зон яркого свечения вдоль канала искры было найдено соответствие по порядку величины.

В другой серии опытов [9] исследовались начальные стадии расширения канала миниатюрных искр в азоте, кислороде, водороде и дейтерии

при давлениях до 20 атм. Схема установки показана на рис. 5. Объектив 2 проецировал изображение канала искры 1 на входной фотокатод 4 ЭОП.

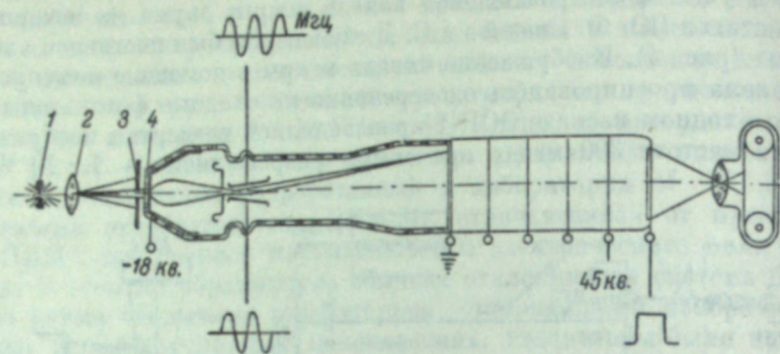


Рис. 5. Установка для исследования расширения канала искры.

Узкая щель 3 выделяла из изображения канала участок небольшой длины. С помощью отклоняющих пластин производилась развертка электронного изображения в направлении вдоль длины канала искры.

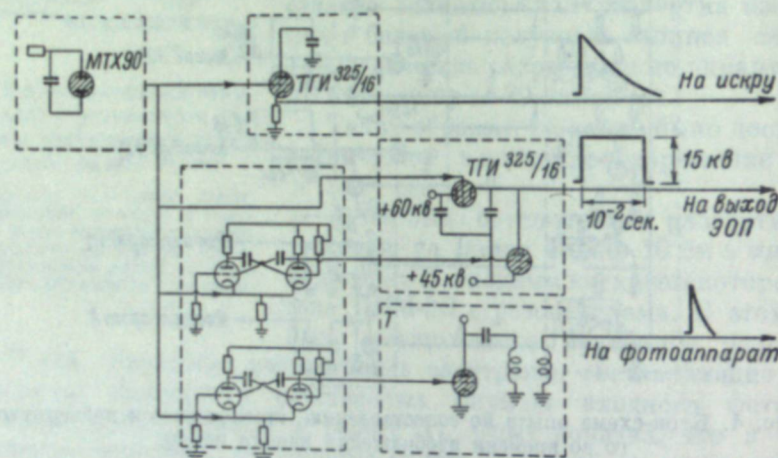


Рис. 6. Блок-схема управления установкой для исследования расширения канала искры.

На рис. 6 показана блок-схема управления работой установки. ЭОП работал только с выходным затвором. Входные затворы не применялись.

На рис. 7 показаны использованные разрядные контуры, а на рис. 8, 9, 10 (см. вклейку, стр. 168, 169) — примеры развернутых по времени

Автор	Емкость, μF	$\left(\frac{dI}{dt}\right)_0$ а · сек. ⁻¹	Газ	v_0 max
Гегечкори [12].	0.0035—0.25	10^8 — 10^{10}	Воздух. Водород. Аргон.	$3 \cdot 10^6$ $4 \cdot 10^5$ $3 \cdot 10^5$
Комельков, Парфенов [13].	132	$1 \cdot 10^{12}$	Воздух.	$2 \cdot 10^6$
Настоящая работа.	0.00003	$3 \cdot 10^{12}$	Азот. Водород. Деутерий.	$6 \cdot 10^6$ $8 \cdot 10^6$ $7 \cdot 10^6$
	0.063	$2 \cdot 10^{12}$	Азот. Водород.	$2.5 \cdot 10^6$ $6 \cdot 10^6$

фотографий расширения канала искры. В таблице приводятся сравнительные данные разрядных контуров, а также значения наблюдавшейся максимальной скорости начального расширения канала искры в настоящей работе и в аналогичных опытах других авторов.

Таблица показывает, что при сходных значениях начальной производной тока скорости начального расширения канала искры оказались близкими, несмотря на большие различия в масштабе емкости разрядного контура. Как показал С. Л. Мандельштам и его сотрудники [10—12], ряд соображений свидетельствует в пользу того, что начальное расширение канала искры имеет характер распространения цилиндрической ударной волны. Поэтому определение скорости этого расширения позволило сделать некоторые заключения о физических условиях в плазме искрового разряда в данных условиях. В частности, было установлено, что в канале искры в водороде плазма имела плотность $\sim 3 \cdot 10^{20}$ см⁻³ и температуру $\sim 40\,000^\circ K$.

2. Применение электронно-оптической хронографии для изучения взаимодействия высокочастотного поля с плазмой

Методом электронно-оптической хронографии изучалось взаимодействие высокочастотного электромагнитного поля с плазмой, находящейся в квазистатическом магнитном поле [14]. Схема экспериментальной установки, использованной в этом случае, представлена на рис. 11. Свет из камеры с плазмой П выходит через узкую щелевую диафрагму и с помощью зеркала Z_1 и объектива O_1 фокусируется на входной фотокатод многокаскадного ЭОП. Одновременно с этим на фотокатод ЭОП проецировалось пятно осциллографа ОК-17М. Горизонтальная развертка осциллографа была выключена, а на его вертикально отклоняющие пластины подавалось синусоидальное напряжение от генератора звуковых сигналов ЗГ-12. Это было сделано для получения отметок времени на развертке исследуемого процесса.

ЭОП работал в ждущем режиме импульсного питания. Был использован входной затвор с опережающей синхронизацией.

В исходном положении входной каскад ЭОП был закрыт с помощью импульсного электронного затвора ПИМ-3. В момент старта исследуемого разряда на пластины затвора подавался прямоугольный импульс напряжения от генератора импульсов ГИ. Затвор открывался на время 5×10^{-3} сек. Одновременно с этим на пластины электрической развертки от того же генератора ГИ подавался импульс пилообразного напряжения с амплитудой в 1.5 кв. В результате этого на экране ЭОП получалось изображение линейной развертки исследуемого процесса, которое фотографировалось аппаратом «Зенит-С».

Типичная фотография развертки высокочастотного разряда, полученная в этих условиях, представлена на рис. 12 (см. вклейку, стр. 169). Можно видеть, что плазма большую часть времени светится слабо и лишь в отдельные моменты ярко вспыхивает. Это связано с физикой исследуемого явления. Как показано в [14], вспышки свечения плазмы наступают

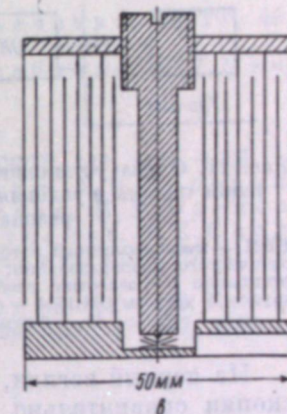
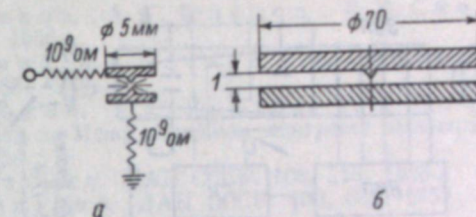


Рис. 7. Разрядные контуры.

в те моменты, когда в плазме создаются условия, необходимые для магнитно-звукового резонанса.

В описываемых опытах производилось также фотографирование развертки спектра свечения плазмы во времени. При этом использовался спектрограф ИСП-51 с линейной дисперсией, изменяющейся в пределах от 19 до 97 Å/мм для области спектра от 4000 до 6000 Å. Полученные на опыте фотографии трех участков спектра водорода представлены на рис. 13 (см. вклейку, стр. 169). Здесь стрелками обозначены нули синусоидально

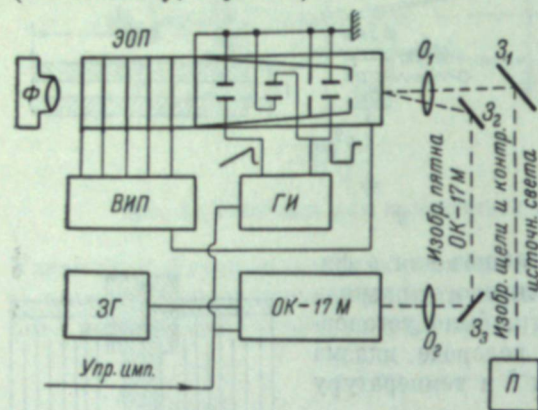


Рис. 11. Схема установки для исследования свечения плазмы в условиях магнитно-звукового резонанса.

ВИП — высоковольтный источник питания электронно-оптического преобразования; ГИ — генератор импульса отпирания и развертки изображения; ЗГ — генератор звуковой частоты; ОК-17М — осциллограф; П — плазма; Ф — фотоаппарат.

На первый взгляд, использование многокаскадных ЭОП для спектроскопии сравнительно большой разрешающей силы затрудняется малой разрешающей способностью многокаскадных ЭОП (10 линий/мм) по сравнению с разрешающей способностью фотографических пластинок (~ 50 линий/мм). В действительности, однако, это не имеет существенного значения. Для получения разрешения на ЭОП, эквивалентного разрешению фотографической пластинки, достаточно увеличить масштаб изображения, подаваемого от спектрографа на фотокатод ЭОП, в 5 раз. На рис. 14 (см. вклейку, стр. 169) в качестве примера приводятся фотографии участков спектра вблизи линии H_β для высокочастотного разряда (а) и для стандартной водородной лампы ДВС-25 (б), полученные в работе [14]. Снимки произведены с помощью пятикаскадного ЭОП и спектрографа ИСП-51 с автоколлимационной камерой УФ-85. Изображением в 8 раз посредством дополнительного объектива. Можно видеть, что линии H_β и $\lambda=4861.77$ Å, отстоящие на расстоянии 0.5 Å друг от друга, достаточно хорошо разрешены. Доплеровская полуширина линии H_β в высокочастотном разряде (рис. 14, а) оказалась равной 0.6 Å, что отвечает температуре плазмы $2 \cdot 10^4$ °К.

Упомянутое выше увеличение масштаба изображения может быть достигнуто и средствами электронной оптики. Для этой цели в лаборатории М. М. Бутслова в настоящее время разработан многокаскадный ЭОП, в котором электронная линза входного каскада обладает 10-кратным

благодаря высокой эффективности использования первичного светового потока применение многокаскадных ЭОП обеспечивает возможность фотографической регистрации временной развертки спектра в одном акте разряда импульсной плазменной установки. Это имеет важное зна-

чение для спектроскопических работ, ведущихся в связи с проблемой осуществления управляемых термоядерных реакций. Как известно, фотографирование спектра в современных установках для термоядерных исследований даже без временной развертки удается лишь путем наложения фотографического эффекта от десятков и сотен актов разряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. К. Завойский, М. М. Бутслов, Г. Е. Смолкин, ДАН СССР, 111, 969, 1956.
2. Е. К. Завойский, М. М. Бутслов, А. Г. Плахов, Г. Е. Смолкин. Атомная энергия, № 4, 34, 1956.
3. М. М. Бутслов, Е. К. Завойский, А. Г. Плахов, Г. Е. Смолкин, С. Д. Фанченко, УНФ, VI, 85, 1959.
4. М. М. Бутслов, Е. К. Завойский, А. Г. Плахов, Г. Е. Смолкин, С. Д. Фанченко. Доклад на Международном конгрессе по высокоскоростной фотографии, Кельн, 1958.
5. Е. К. Завойский, С. Д. Фанченко, ДАН СССР, 108, 218, 1956.
6. Е. К. Завойский, С. Д. Фанченко, ДАН СССР, 100, 661, 1955.
7. М. М. Бутслов, УНФ, VI, 76, 1959.
8. Г. Е. Смолкин, ПТЭ, № 4, 60, 1957.
9. Б. А. Демидов, Ю. Ф. Скачков, С. Д. Фанченко, ЖЭТФ, 40, 385, 1961.
10. И. С. Абрамсон, Н. М. Гегечкори, С. И. Драбкина, С. Л. Мандельштам, ЖЭТФ, 17, 862, 1947.
11. С. И. Драбкина, ЖЭТФ, 21, 473, 1951.
12. Н. М. Гегечкори, ЖЭТФ, 21, 493, 1951.
13. В. С. Комельков, Д. С. Парфенов, ДАН СССР, 111, 1215, 1956.
14. А. П. Ахматов, П. И. Блинов, В. Ф. Болотин, А. В. Бородин, П. П. Гаврин, Е. К. Завойский, И. А. Кован, М. Н. Оганов, Б. И. Патрушев, Е. В. Пискарев, Д. В. Русанов, Г. Е. Смолкин, А. Р. Стриганов, Д. А. Франк-Каменецкий, П. А. Черемных, Р. В. Чикин, ЖЭТФ, 39, 527, 1960.
15. В. Ф. Болотин, Е. К. Завойский, М. Н. Оганов, Г. Е. Смолкин, А. Р. Стриганов. Изв. АН СССР, серия физ., 27, 872, 1963.

В. С. КОМЕЛЬКОВ, С. С. ЦЕРЕВИТИНОВ

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ФОТОСЪЕМКА МОЩНЫХ РАЗРЯДОВ В ГАЗАХ

При изучении мощных разрядов в газах высокоскоростные методы фотографирования позволяют изучать динамику движения плазмы и ее сгустков, изучать спектры излучений и их изменения во времени, определять температуру, плотность, загрязненность и другие характеристики плазмы.

Достоинство оптических методов состоит в том, что они позволяют изучать процесс, не вмешиваясь в его развитие и не изменяя свойств плазмы. Это обстоятельство особенно важно при изучении высокотемпературной плазмы. Изучая разряды, создаваемые импульсами тока до $2 \cdot 10^6$ а с периодом колебаний $10 \div 100$ мксек., мы широко применяли скоростные фоторегистраторы ЭФР и ячейки Керра.

Ниже описаны приспособления, устройства и методы, позволяющие использовать выпускаемые нашей промышленностью фоторегистрирующие приборы для исследования высокотемпературной плазмы.

Фотосъемка скоростным фоторегистратором (СФР)

Выпускаемые нашей промышленностью камеры типа СФР [1] обладают необходимыми данными для съемки мощных разрядов, хотя и не полностью приспособлены для этих целей.

Кадровая съемка (режим «лупы времени») применялась нами для изучения сравнительно сложных картин движения плазмы [2, 3]. В этом режиме СФР позволяет получить 240 кадров в темпе до $2.5 \cdot 10^6$ кадров/сек. с разрешением около 16 линий/мм.

В режиме фоторазвертки удобно изучать более простые процессы (расширение и сжатие канала разряда, движение ударных волн и сгустков плазмы). Предельное разрешение во времени, получаемое в этом режиме, при ширине щели 0.01 мм составляет около 10^{-8} сек.

Следует указать на пять существенных недостатков, сильно ограничивающих возможности эксперимента и применения этих камер для изучения плазмы.

1. Недостаточная светосила (препятствующая, например, съемке мощных разрядов в водороде и дейтерии при малых давлениях газа и коротких выдержках).

2. Недостаточное разрешение по времени при кадровой съемке плазмы, движущейся со скоростью $5 \cdot 10^6 \div 5 \cdot 10^7$ см/сек. Для наблюдения плазмы при таких скоростях требуется сократить выдержку на порядок по сравнению с наименьшей возможной для этих камер ($0.5 \cdot 10^{-6}$ сек.).

3. Отсутствие ждущего режима.

К ст. В. С. Комелькова и др.,
стр. 185.

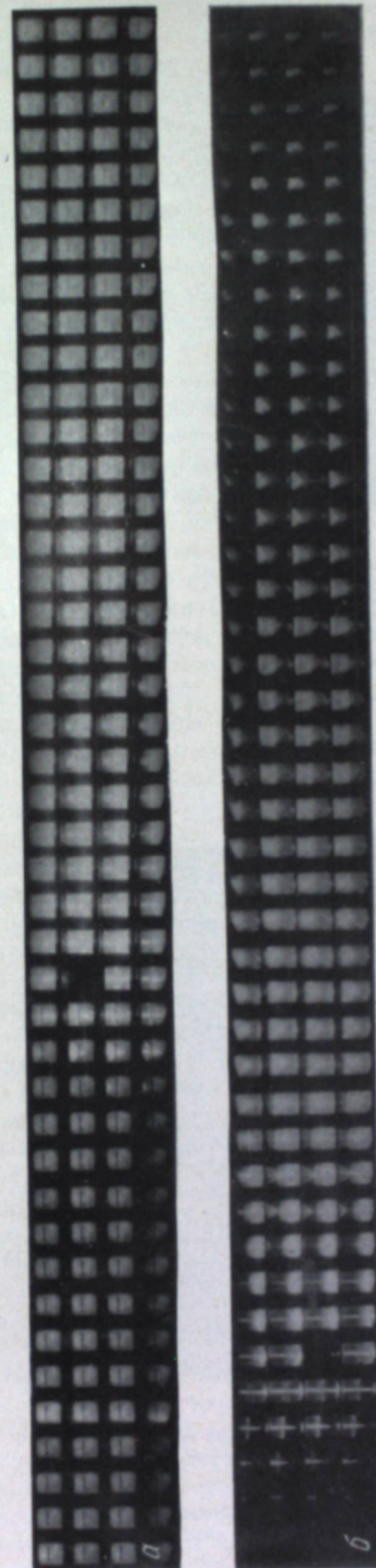


Рис. 1. Фотограммы динамического токового шнура (максимальный ток разряда 500 ка, начальное давление водорода 1 мм рт. ст., темп съемки — $2 \cdot 10^6$ кадров/сек.).
а — без отсечки свечения второго оборота зеркала СФР обтуратором — 6 тыс. об./мин. Скорость вращения зеркала СФР — 60 тыс. об./мин., диска обтуратора — 6 тыс. об./мин. Время перекрытия затвора около 80 мксек.; время одного оборота зеркала — 1000 мксек.

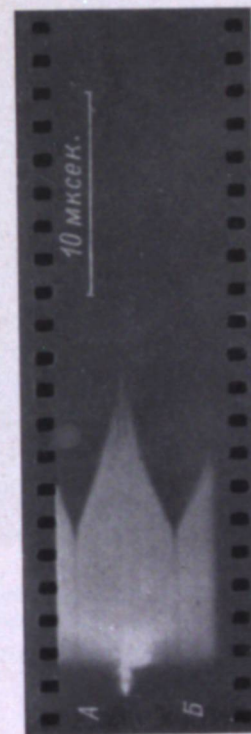


Рис. 3. Фоторазвертка (слева направо) разряда медной проволоки (диаметр 100 мк) в вакууме при пропускании через нее мощного импульса тока.
Черные расширяющиеся веерообразные полосы — перекрытие светового поля аэтровакварным затвором типа (рис. 2, а). Проволочки затвора находились в точках А и Б.

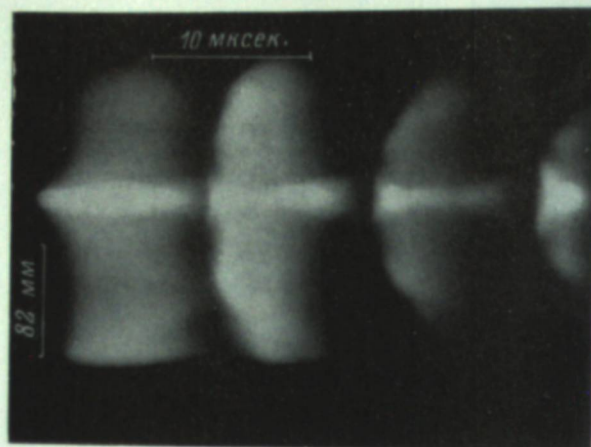


Рис. 7. Фоторазвертка разряда, снятая в свете непрерывного излучения (континуума) в спектральном интервале $\Delta\lambda=50 \text{ \AA}$ (в области $\lambda=6200 \text{ \AA}$).

Развертка слева направо. Свечение в центре — излучение токового шнура. Поперечные полосы — свечение стеклянных стенок камеры, вдоль которых течет электрический ток. Видны 4 полупериода разряда.

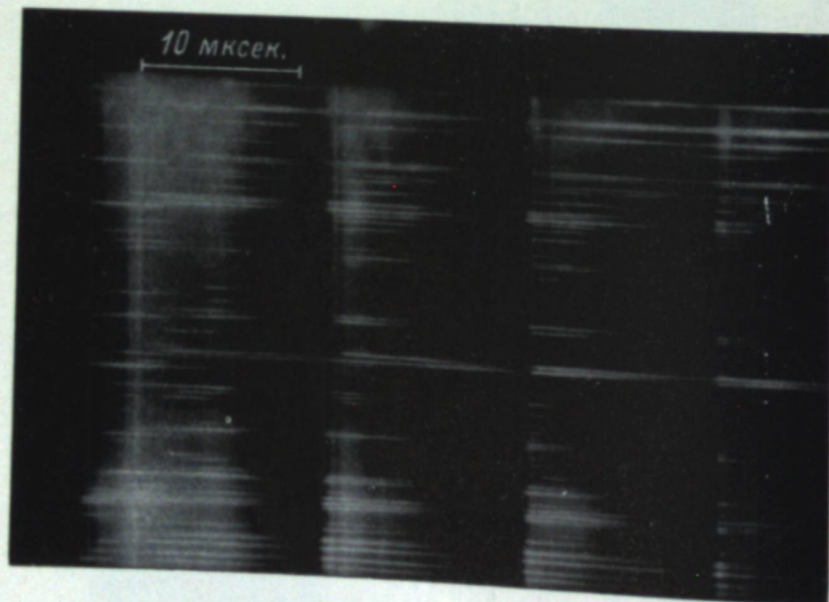


Рис. 8. Временная фоторазвертка участка спектра ($\Delta\lambda=4500-6600 \text{ \AA}$) излучения плазмы (спектрограф ИСП-51; скорость вращения зеркала СФР — 15 000 об./мин.; максимальный ток разряда — 500 ка).

Развертка производилась слева направо. На фотографии видно 3,5 полупериода изменения разрядного тока (около 120 мксек.). Разрешение по времени — не менее 1 мксек.

4. Отсутствие быстродействующего затвора, который перекрывал бы объектив за время, меньшее времени одного оборота зеркала при максимальной скорости записи.

5. Отсутствие устройства, позволяющего с помощью маркирующих меток привести к единой системе отсчета времени все сопутствующие фоторегистрации осциллограммы (токов и напряжений, нейтронных импульсов, сигналов зондов и т. д.).

Для устранения первых трех недостатков необходимы коренные изменения и, возможно, другие принципиальные основы конструкции, обсуждение которых выходит за рамки настоящей статьи.

Четвертый и пятый недостатки, весьма существенные при исследовании разрядов, удалось устранить с помощью довольно простых приспособлений.

При изучении плазмы мощных разрядов очень часто интенсивность и длительность свечения газа и стенок разрядного объема столь велики, что на снятое изображение при последующих оборотах зеркала СФР происходит наложение фона свечения. Это резко снижает качество фототграмм. Для отсеки фона в качестве быстродействующих нами применялись два типа затворов: obtюраторный и электровзрывной. Первый тип затвора (разработанный по предложению и при участии Г. Н. Аретова) применялся при работе камеры в режиме «дуплы времени». Он представляет собой сбалансированный дюралюминиевый диск диаметром 200 мм, имеющий секторную прорезь с углом 9° . Диск располагается перед объективом и раскручивается электродвигателем до нужной скорости. Аналогично зеркалу СФР затвор снабжен электромагнитным датчиком импульсов. Эти импульсы используются для определения скорости вращения диска и для инициирования исследуемого явления. Пульт СФР работает в командном режиме. Иницирование происходит при нажатой кнопке «пуск» на пульте управления в момент, когда центр прорези obtюратора совпал с оптической осью объектива СФР, и вращающееся зеркало СФР находится в определенном положении. Этот момент определяется схемой совпадений, имеющейся в пульте управления СФР (эта схема применяется при спаренной работе двух камер). Относительное положение прорези диска и электромагнитного датчика может изменяться в пределах 360° .

При скорости вращения диска 12 000 об./мин. прорезь obtюратора полностью открывает и закрывает диафрагмы входного объектива за 130 мксек. Длительная работа с obtюраторным затвором показала его полную надежность. На 2 фототграммах (рис. 1, а, б; см. вклейку, стр. 184) показаны примеры съемок без быстродействующего затвора (а) и с obtюратором (б). Фотографировался устойчивый динамический токовый шнур [2, 3] при максимальном токе разряда 500 ка.

На верхней фототграфии видно, что начальные фазы явления завуалированы свечением, накладывающимся при последующих оборотах зеркала СФР.

На нижней фототграмме перекрытие затвора произошло примерно через 80 мксек. после начала разряда и засветки кадров начальной фазы процесса не произошло. Скорость вращения obtюраторного диска составляла 6000 об./мин.

Быстродействующие электровзрывные затворы были описаны ранее (см. журн. «Приборы и техника эксперимента», № 1, 1956, ст. В. С. Комелькова и Б. П. Сурнина). Они работают в режиме «открыт—закрыт» и представляют собой прозрачные пластинки силикатного или органического стекла, теряющие свою прозрачность при растрескивании. Последнее вызывается взрывом проволочек при пропускании через них мощного импульса тока от заряженных конденсаторов. Время перекрытия определяется типом прозрачного материала, количеством и расположением взрывающихся проволочек, а также мощностью импульса тока.

Конденсаторы, в цепь которых включаются проволоочки затворов, присоединяются параллельно основному контуру или действуют в самостоятельных схемах, синхронизируемых с моментом съемки. Величина емкости и рабочее напряжение конденсаторов определяется длиной и сечением проволоочки, размерами затвора и требуемым временем перекрытия. Конструктивные схемы электровзрывных затворов приведены на рис. 2.

Такие затворы позволяют перекрывать световую площадь 30 см^2 за $7 \div 20$ мксек. При достаточно малой площади светового канала время срабатывания можно снизить до $1 \div 2$ мксек.

На фото (рис. 3; см. вклейку, стр. 184) показана фоторазвертка взрыва медной проволоочки (диаметр 100 мк) в вакууме.¹ Максимальный ток в разряде — $1.7 \cdot 10^6 \text{ а}$. Черные клинообразные полосы, перекрывающие снимок, — результат срабатывания взрывного затвора (проволочки которого размещены в точках А и Б). Полное перекрытие поля произошло за 13 мксек.

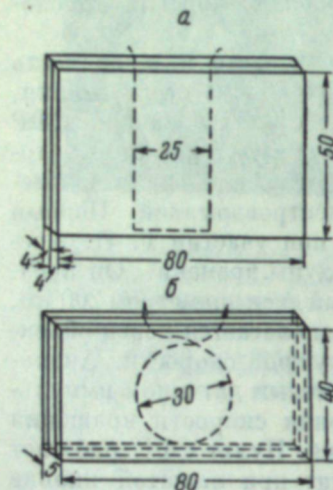


Рис. 2. Конструктивные схемы электровзрывных затворов из силикатного стекла.

а — с прямоугольной, б — с кольцевой проволокой.

Одним из главных недостатков взрывных затворов является необходимость замены их после каждого опыта, ценным же качеством является возможность использования их в ждущем режиме.

Отметки точной временной синхронизации фотограмм с другими регистрациями можно получать двумя путями: нанесением меток на пленку СФР и на другие записи от посторонней схемы или, наоборот, получением маркерного импульса с фотопленки СФР в момент ее экспонирования.

Первый вариант используется для съемок в режиме фоторазвертки. На отрезке кабеля формируется прямоугольный импульс напряжения амплитудой 15 кв, длительностью $0.1 \div 0.2$ мксек. Этот импульс в нужный момент времени подается на искровой промежуток.

Последний размещен непосредственно у входной щели фоторегистратора [1] таким образом, чтобы его изображение проецировалось на край фотопленки (рис. 8, где в верхней левой части видна такая метка). В цепь искрового промежутка включается сопротивление, равное волновому сопротивлению кабеля.

Второй импульс, одновременно генерируемый той же схемой, в тот же момент времени поступает на пластины или на модулятор яркости луча осциллографа.

При кадровой съемке более удобным оказался второй вариант, примененный ранее в работе [5]. В этой схеме (рис. 4) часть света, строящего изображение 1, проходит через фотопленку 4 и далее через небольшое отверстие 6 (диам. $2 \div 3$ мм) в прижимном столе и в съемной крышке 5 прибора на катод фотоумножителя. Отверстие 6 сделано против одной из линз линзовой вставки 3. Положение метки на пленке определяется по соседнему незасвеченному кадру (его линза 8 закрывается светонепроницаемым материалом). Импульс на выходе фотоумножителя появляется в момент экспонирования кадра, расположенного против отверстия, и подается либо на отдельную пару пластин осциллографа, либо на ту же пару, на которую подается сигнал явления (ток, напряжение). Схема соединений входа осциллографа в этом последнем случае изменяется, согласно рис. 5.

¹ Фотография (рис. 3) получена Д. С. Парфеновым.

Применение СФР для развертки спектров излучений и развертки изображения в свете отдельной спектральной линии позволяет получать ценные данные об изменении во времени и пространстве температуры и плотности частиц, распределении в разрядном объеме примесей загрязнений и т. д.

Впервые метод фоторазвертки в свете отдельной линии для исследования самосжимающихся разрядов [4] был применен С. Ю. Лукьяновым и В. И. Силиным. В этой схеме (рис. 6) изображение изучаемого участка разряда 1 строится объективом 2 на входной щели 3 монохроматора. С помощью выходной щели 7 выделяется нужный спектральный интервал, в свете которого фиксируется изображение, развертываемое зеркалом 9 СФР.

На фотографии (рис. 7; см. вклейку, стр. 185) приведена фоторазвертка динамического токового шнура, о котором говорилось выше, в свете спектрального интервала $\Delta\lambda$, равного $50 \text{ \AA}$ (в области $\lambda = 6200 \text{ \AA}$). На входную щель монохроматора УМ-2 проектировался участок камеры шириной 200 мм и высотой 2 мм, отстоящий на 20 мм от электродов. Временное разрешение оптической системы при скорости вращения зеркала 15 000 об./мин. и при выбранной ширине входной щели монохроматора составляло 1.3 мксек. Скорость вращения зеркала и ширина щели обычно определяются яркостью свечения исследуемых линий. Развертка проводилась слева направо. Яркое свечение в центре камеры (узкая полоса) соответствует излучению токового шнура. Широкие поперечные полосы с размытыми краями — свечение стеклянных стенок разрядной камеры. В качестве объектива 8 может быть использован объектив РО-2, придающийся к СФР.

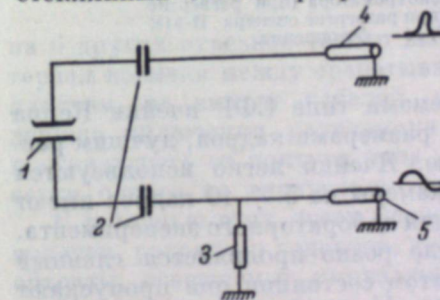


Рис. 5. Схема включения пластин осциллографа в случае записи одним лучом и явления и импульса метки времени.

1 — отклоняющие пластины осциллографа; 2 — разделительные конденсаторы (КБГИ-0.05 $\times$ 400 в); 3 — согласующее сопротивление (90 ом); 4 — вход импульса синхронизации; 5 — вход сигнала явления (ток, напряжение).

На фотографии (рис. 8; см. вклейку, стр. 185) приведен пример такой регистрации, выполненной при помощи спектрографа ИСП-51 и фоторегистратора СФР.¹ Развертывался участок спектра $4500 \div 6000 \text{ \AA}$, динамического токового шнура. Скорость вращения зеркала СФР — 15 000 об./мин. На фотографии видно 3.5 полупериода изменения разрядного тока. Разрешение по времени не хуже 1 мксек.

¹ Фотографии рис. 7 и 8 получены Ю. В. Скворцовым.

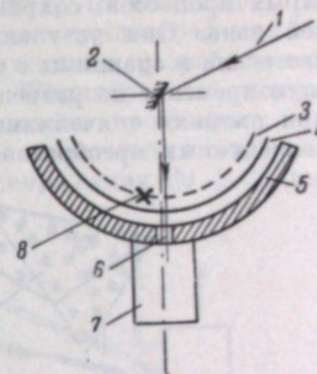


Рис. 4. Схема временной синхронизации фотограммы в режиме «Лупы времени» с осциллографическими регистрациями.

1 — световой поток изображения; 2 — вращающееся зеркало СФР; 3 — линзовая вставка СФР; 4 — фотопленка; 5 — съемная крышка камеры; 6 — отверстие в съемной крышке и прижимном столе; 7 — конус фотоумножителя, укрепленный на съемной крышке; 8 — линза, закрытая светонепроницаемым материалом.

Съемка с ячейками Керра

Ячейки Керра уже десятки лет применяются для исследования быстрых процессов, сохраняя свое значение для скоростных съемок и по сей день. Они уступают электронно-оптическим преобразователям по светосиле и сравнимы с современными образцами электронно-оптических «луп времени» по разрешению во времени. Разрешение по изображению при съемках с ячейками Керра может даже превосходить разрешение современных преобразователей, работающих в импульсном режиме. По

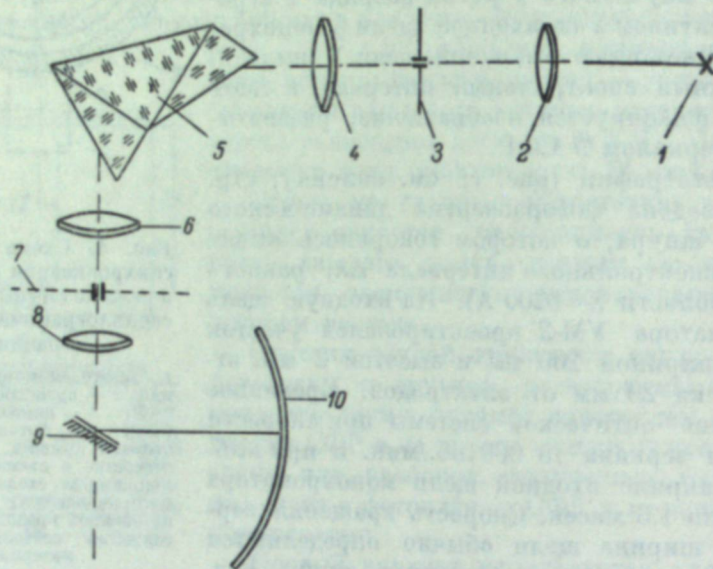


Рис. 6. Оптическая схема развертки изображения в свете отдельной спектральной линии.

1 — исследуемый светящийся объект; 2 — конденсор; 3 — входная щель монохроматора (при развертке спектра — спектрографа); 4 — объектив коллиматора; 5 — диспергирующая призма; 6 — объектив зрительной трубы; 7 — выходная щель монохроматора (при развертке спектра отсутствует); 8 — объектив РО-2 (при развертке спектра И-51); 9 — вращающееся зеркало СФР; 10 — фотопленка.

сравнению с оптико-механическими системами типа СФР ячейки Керра обладают: большей светосилой, большими размерами кадров, лучшим разрешением во времени и по изображению. Ячейки легко используются в ждущем режиме. Сооружаемые из них камеры на $5 \div 10$ кадров имеют небольшие габариты и могут применяться для лабораторного эксперимента.

При съемке мощных разрядов особенно резко проявляется главный недостаток Керровских затворов: в закрытом состоянии они пропускают часть падающего в них света. При съемке с малыми выдержками (порядка 10^{-7} сек.) устранить наложение фона от последующего более сильного и более длительного свечения полностью не удастся высококачественными призмами Глана. Однако в случае применения электровзрывных затворов удовлетворительный результат получен даже с обычными поляроидами.

В применяемых нами ячейках ФП-15 конструкции ГОИ поворот плоскости поляризации на 90° (и тем самым ее открытие) достигается при подаче на пластины ячейки прямоугольного импульса напряжения величиной $15 \div 16$ кв.

На рис. 9 показана схема эксперимента при съемке с ячейками Керра. Замыкание цепи основного контура тока вызывает разряд предварительно заряженной конденсаторной батареи 1 через камеру 3 и срабатывание (через некоторое время) взрывного затвора 6. Если

объект съемки велик, то затворы 7 устанавливаются перед каждой ячейкой 4. Импульс напряжения, индуцируемого током основного контура в катушке 5, используется для запуска схемы управления, посылающей на ячейки рабочие импульсы амплитудой $15 \div 16$ кв. Кабель 10 служит для передачи маркировочного импульса на осциллограф или на скоростной фоторегистратор. Схема управления ячейками, разработанная и действующая с 1950 г.¹ приведена на рис. 10. Формирование высоковольтных прямоугольных импульсов $0.1 \div 0.2$ мсек. происходит при разряде через разрядник Р шести параллельно включенных отрезков кабеля РК-3 (предварительно заряжаемых до напряжения $30 \div 32$ кв)

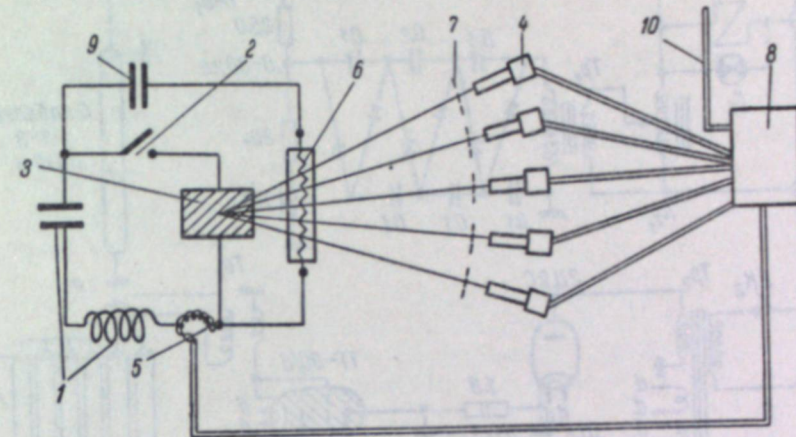


Рис. 9. Блок-схема аппаратуры для съемки разряда 5 ячейками Керра.

1 — емкость и индуктивность контура тока; 2 — разрядник; 3 — разрядная камера; 4 — ячейка Керра; 5 — поиск Роговского (дифференцирующий); 6 — электровзрывной затвор; 7 — другое возможное положение взрывных затворов; 8 — схема управления ячейками; 9 — конденсатор, вызывающий взрыв проволоки взрывного затвора; 10 — выход сигнала для синхронизации с фоторазверткой и осциллографом.

на 6 других отрезков такого же кабеля. Длиной последних задается интервал времени между срабатыванием Р и открытием ячеек. Параллельно ячейкам, на выходе кабелей, включены волновые сопротивления. Задержка включения разрядника Р относительно пускового импульса, поступающего от контура тока, достигается за счет цепочки R_1C_1 в цепи сетки одного из тиратронов схемы управления.

С помощью этих ячеек регистрировались электрические взрывы проволок, разряды в водороде, дейтерии и в воздухе, а также несветящиеся объекты, освещаемые импульсными источниками света.

На фотографиях (рис. 11; см. вклейку, стр. 192) представлены фоторазвертка (а) и керрограммы мощного разряда при токе около $1.2 \cdot 10^6$ а в цилиндрической камере. Начальное давление дейтерия в камере — 10 мм рт. ст., электроды — конические. Выдержки керрограмм — 0.2 мсек., интервал между кадрами — 0.2 мсек. На фоторазвертке римскими цифрами отмечены моменты срабатывания ячеек (I, II, III), соответствующие керрограммам, приведенным на рис. 11, б, в и г.

На фотографиях (рис. 12; см. вклейку, стр. 192) представлены керрограммы расширения канала искры в воздухе при токе около $2 \cdot 10^6$ а. Эти фотографии показали, что при мощных разрядах расширение канала искры имеет весьма сложный характер. Имеют место локальные выбросы плазмы.

¹ В разработке приняли участие Е. В. Борисенко и Б. П. Сурнин.

В заключение авторы выражают свою благодарность научным сотрудникам Г. Н. Аретову, Е. В. Борисенко, В. И. Васильеву, Д.С. Пар-

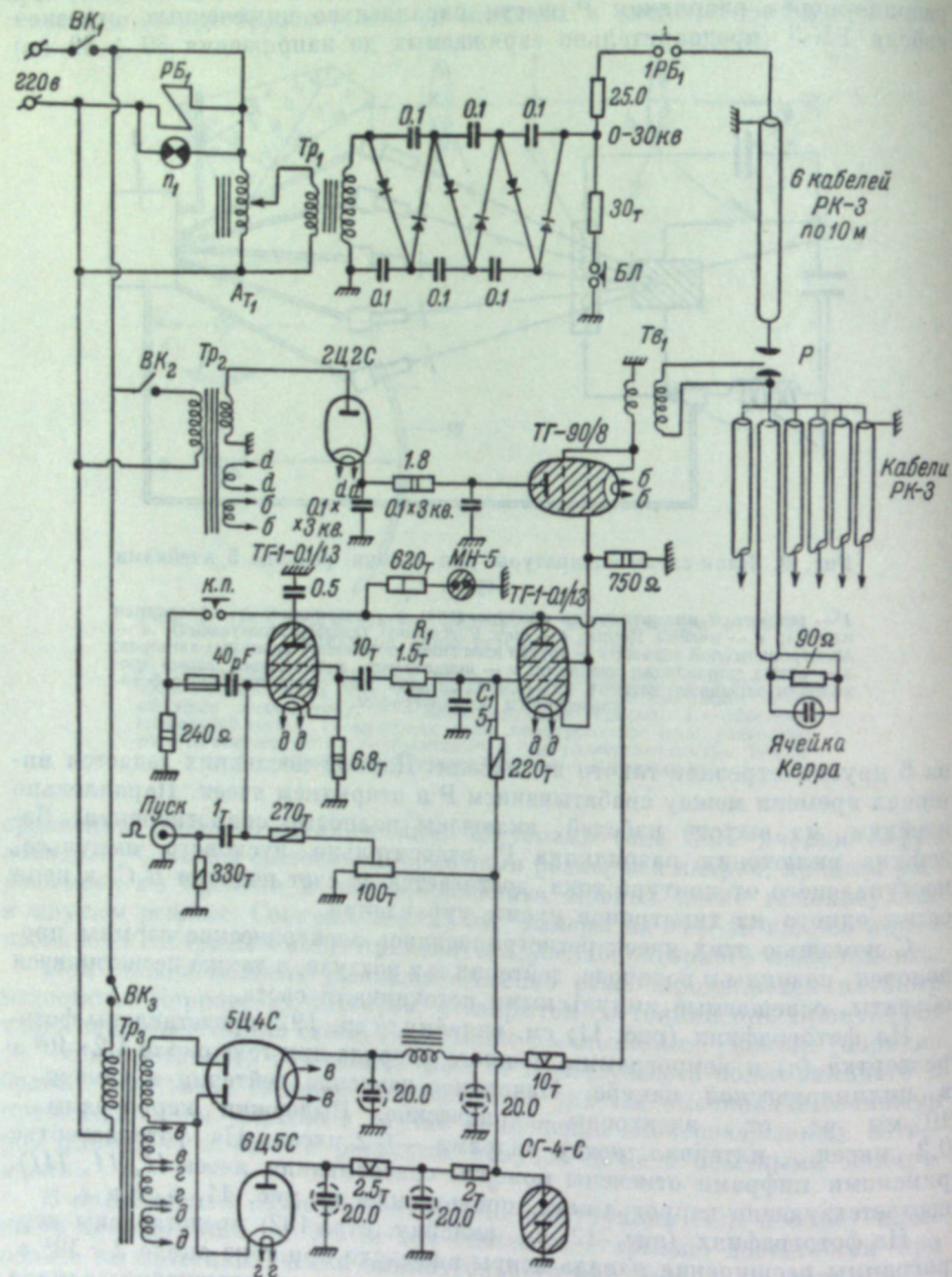


Рис. 10. Принципиальная схема блока управления ячейками Керра.

фенову, Ю. В. Скворцову и Б. П. Сурнину, совместно с которыми проводились описанные выше эксперименты.

1. В. Б. Ликоренко, УНФ, VI, 131—138, 1959.
2. В. С. Комельков, Тр. 2-й Междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии, т. I, 133, Изд. «Главатом», М., 1959.
3. В. И. Васильев, В. С. Комельков, Ю. В. Скворцов, С. С. Цере-витинцов, ЖТФ, 30, 756, 1960.
4. С. Ю. Лукьянов, В. И. Силицын, Тр. Междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии, т. I, 99, Изд. «Главатом», М., 1959.
5. Н. А. Бораунов, Д. В. Орлинский, С. М. Осовец, «Атомная энергия», т. 4, вып. 2, стр. 149, 1958.

Ф. А. КОРОЛЕВ, О. Ф. КУЛИКОВ, А. С. ЯРОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ПРОЦЕССА УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В СИНХРОТРОНЕ С ПОМОЩЬЮ СКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ

Электроны, движущиеся по круговым орбитам в современных циклических ускорителях и разгоняемые до весьма больших энергий (порядка нескольких сотен Мэв), испускают по касательной к своей траектории интенсивное электромагнитное излучение. Это электромагнитное излучение, теоретически предсказанное Д. Д. Иваненко и И. Я. Померанчуком в 1944 г. [1], играет большую роль в процессе ускорения электронов в бетатронах и синхротронах, а также имеет существенное значение для некоторых космических явлений. Поэтому несомненный интерес представляет экспериментальное исследование свойств этого нового вида электромагнитного излучения.

Особенностью электромагнитного излучения ускоренных электронов является то, что при энергии электронов уже в несколько десятков (30 ÷ 50) Мэв излучение достигает видимой области спектра и электроны становятся светящимися в буквальном смысле слова.

Электроны таких энергий движутся в вакуумной камере ускорителя со скоростью, очень мало отличающейся от скорости света, и излучают свет вперед по направлению движения с очень узким конусом излучения (угол раствора конуса порядка 1°). Эта особенность излучения электронов в магнитном поле ускорителей и сильная зависимость мощности излучения от энергии электронов позволили наблюдать непосредственно движение электронов в вакууме. Впервые это излучение было наблюденно в 1947 г. Сьютсом [2] и Хабером [3] на синхротроне в 70 Мэв фирмы «Дженерал электрик». В 1948 г. группой Поллака [4] было произведено первое скоростное фотографирование этого излучения.

Нами производилось экспериментальное исследование поляризационных свойств и углового распределения интенсивности излучения электронов, ускоряемых до весьма высоких энергий в синхротроне ФИАН на 680 Мэв. Для регистрации излучения использовалась киносъемка излучения скоростной кинокамерой СКС-1. Так как время ускорения электронов до максимальной энергии в этом синхротроне довольно велико (порядка 0.7 сек.), то для исследования излучения оказалась достаточной скорость съемки 500 кадров в секунду. Оптическая схема установки показана на рис. 1. Кинокамерой фотографировалось световое пятно, образующееся в фокальной плоскости линзы L_1 , которое характеризует угловое распределение интенсивности излучения электронов. Наличие диафрагмы шириною 4 мм в фокальной плоскости этой линзы и призмы Волластона позволило получить угловое распределение излучения для двух

К ст. В. С. Комелькова и др.,
стр. 189.

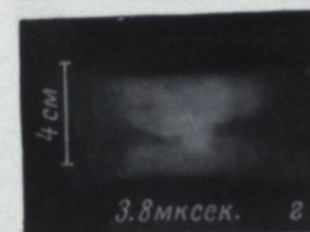
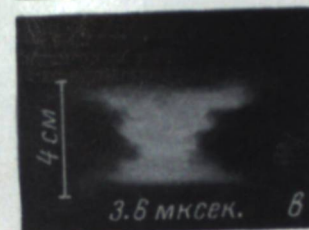
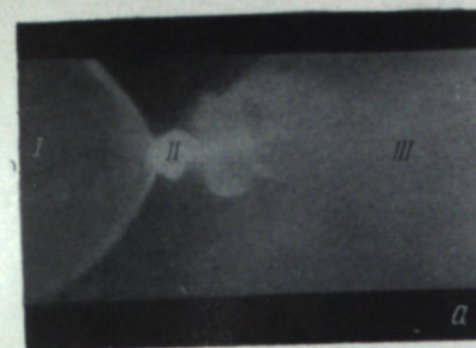


Рис. 11. Фоторазвертка и керрограммы разряда в цилиндрической камере с коническими электродами (начальное давление дейтерия в камере 10 мм рт. ст.).

На фоторазвертке (а) римскими цифрами отмечены моменты срабатывания ячеек (I, II, III), керрограммы которых показаны на рисунках б, в и г.

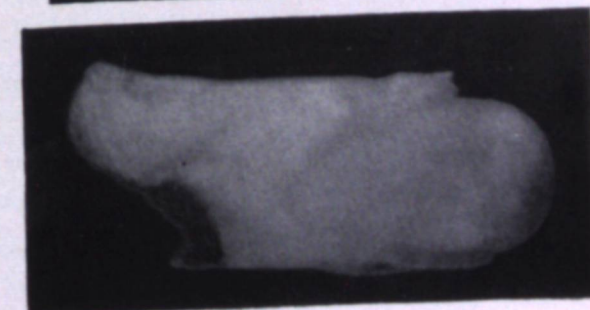


Рис. 12. Керрограммы расширения канала искры в воздухе при токе около $2 \cdot 10^6$ а (полученные последовательно с экспозицией 0.2 мксек.).

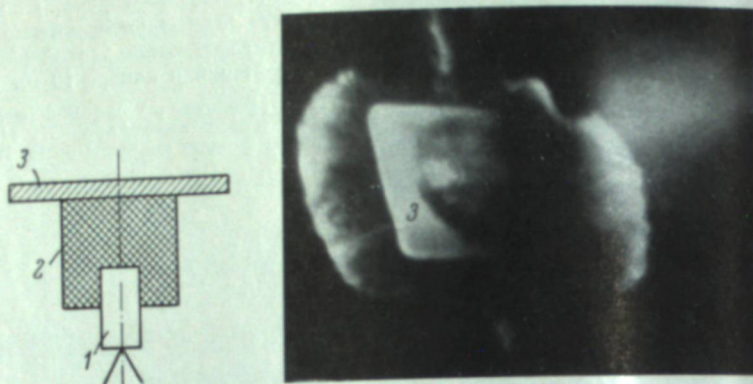


Рис. 13. Фотография летящей стальной пластины, отброшенной и деформированной взрывом тэновой шашки.

1 — капсуль-детонатор; 2 — шашка из флегматизированного тэна; 3 — металлическая пластина. Снимок получен ячейкой Керра при экспозиции $2 \cdot 10^{-7}$ сек. Пластина освещена импульсной вспышкой, полученной при разряде конденсатора на вольфрамовую проволочку.

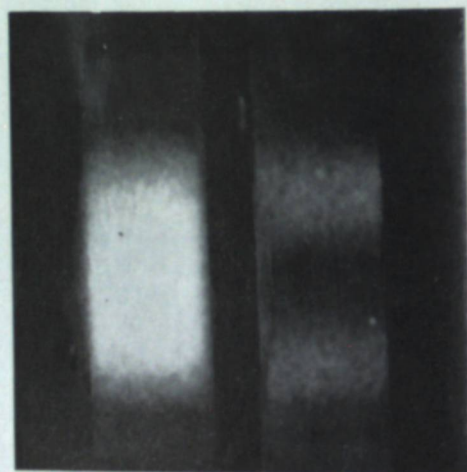


Рис. 2. Фотография углового распределения интенсивности в компонентах поляризации излучения электронов с энергией 500 Мэв на длине волны 4360 Å. Менее интенсивная компонента с минимумом интенсивности посредине — П-компонента.

компонент поляризации, предсказанное теоретически в работе А. А. Соколова и И. М. Тернова [5]. Теорией было предсказано, что излучение электронов имеет две компоненты поляризации с электрическим вектором, лежащим в плоскости орбиты электрона (σ -компонента), и с электрическим вектором, перпендикулярным этой плоскости (π -компонента), причем эти компоненты поляризации отличаются друг от друга интенсивностью и имеют различное угловое распределение излучения. В частности, π -компонента поляризации имеет минимум излучения в направлении мгновенной скорости движения электрона. Съемка производилась на пленке МЗ-2 чувствительностью 65 ед. ГОСТа. Для пересчета почернений изображения в интенсивности излучения производилась съемка с той же скоростью ступенчатого клина, освещенного светом электронов, по данным фотометрирования которого строилась характеристическая кривая.

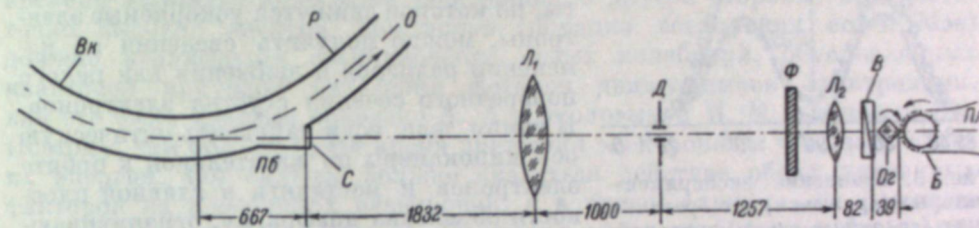


Рис. 1. Оптическая схема установки.

Вк — вакуумная камера синхротрона; Пб — патрубок для вывода излучения электронов; О — орбита электронов; С — стекло оптического окна патрубка; Р — призматический участок вакуумной камеры; Л₁ — объектив «Телемар» с фокусным расстоянием 1000 мм; Д — диафрагма; Ф — светофильтр; Л₂ — объектив типа Ж-25 с фокусным расстоянием 100 мм; В — призма Волластона; О₂ — призма оптического компенсатора камеры СКС-1; Б — подающий барабан камеры СКС-1; Пл — кинопленка.

Для привязки отдельных кадров по времени к определенной фазе цикла ускорения неоновая лампочка-метка времени кинокамеры питалась током от генератора звуковой частоты ЗГ-10. Свечение электронов регистрировалось пленкой начиная с энергии около 150 Мэв. Интенсивность излучения сильно возрастает с увеличением энергии электронов; для того чтобы получить пригодные для фотометрирования (не переэкспонированные) кадры на всем протяжении цикла ускорения, на одну из граней призмы оптического компенсатора было нанесено тонкое серебряное покрытие, ослаблявшее проходящий свет в семь раз. Из всего оптического спектра излучения электронов, имеющего характер непрерывного и при энергиях в сотни Мэв почти равномерного, стеклянными светофильтрами выделялись небольшие спектральные участки с максимумами на длинах волн 4360 и 5780 Å. Фотография типичного кадра фильма, на котором и снято изменение углового распределения излучения электронов, приведена на рис. 2 (см. вклейку, стр. 193). Фотометрированием полученных снимков на микрофотометре МФ-4 были получены кривые относительного углового распределения интенсивности в обеих компонентах поляризации при различных энергиях электронов. Одна из таких кривых приведена на рис. 3. Сравнивая полученные экспериментальные данные с теоретическими [6], можно констатировать хорошее согласие их вплоть до энергии 680 Мэв.

Большим удобством скоростной киносъемки такого рода процессов является не только наглядность и возможность многократного промера кадров, но также и достаточно хорошая разрешающая способность во времени.

Интегрируя значения относительной интенсивности излучения по всем углам для обеих компонент поляризации и подсчитывая отношение полученных сумм, впервые удалось экспериментально измерить это отношение для широкого диапазона энергии электронов. На рис. 4 приведено

сравнение экспериментальных данных, полученных таким образом, с результатами теоретического расчета отношений интенсивностей излучения для обеих компонент поляризации [6]. Эксперимент и в этом случае показал хорошее согласие с теорией вплоть до энергии порядка 700 Мэв.

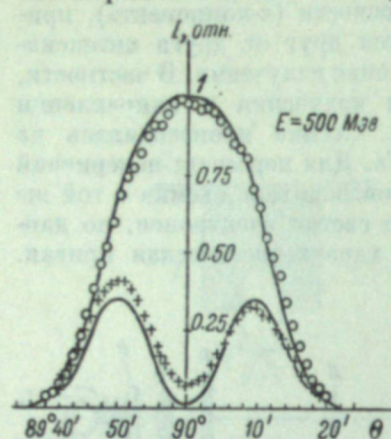


Рис. 3. Сравнение экспериментальных (крюжочки) и теоретических (сплошные линии) значений относительных интенсивностей $I_{отн}$ излучения электронов от угла θ , отсчитываемого от направления магнитного поля синхротрона (вертикаль).

$\theta = 90^\circ$ — соответствует направлению мгновенной скорости электрона.

протяженности, который практически будет представлять собой поперечное сечение достаточно протяженного по азимуту (порядка 3 м) сгустка электронов. В нашем эксперименте азимутальные размеры участка орбиты, с которого излучение попадало на киноплёнку, составляли 40 мм. Фотометрируя полученные снимки поперечного сечения сгустка электронов в двух взаимно перпендикулярных направлениях (горизонтальном, соответствующем радиусу ускорителя, и вертикальном, составляющем направление магнитного поля), можно определить распределение освещённости в изображении по этим двум направлениям. Это распределение освещённости зависит от амплитуд колебаний, совершаемых электронами в процессе движения вокруг равновесной орбиты, и от распределения электронов по амплитудам этих колебаний. Зная закон этого распределения, можно измерить среднеквадратичные амплитуды колебаний электронов, определяя ширину соответствующего распределения освещённости для каждого кадра на уровне, составляющем 0.368 от максимального значения, принятого за единицу. Такие измерения были выпол-

Применение скоростной фотографии для регистрации синхротронного излучения ускоряемых электронов позволило не только изучить некоторые свойства этого излучения, но и исследовать непосредственным образом движение ускоряемых электронов в вакуумной камере ускорителя. Фотографируя с помощью скоростной кинокамеры небольшой участок орбиты, по которой движутся ускоряемые электроны, можно получить сведения об изменении размеров и движении как целого поперечного сечения сгустка электронов. В самом деле, если направить оптическую ось кинокамеры по касательной к орбите электронов и поставить в главной плоскости объектива диафрагму, ограничивающую размеры светового пучка в горизонтальной плоскости, то чем меньше будет отверстие этой диафрагмы, тем с меньшего участка орбиты электронов излучение будет попадать на киноплёнку. Таким образом, выбирая достаточно малое отверстие диафрагмы, можно регистрировать излучение с участка орбиты очень малой

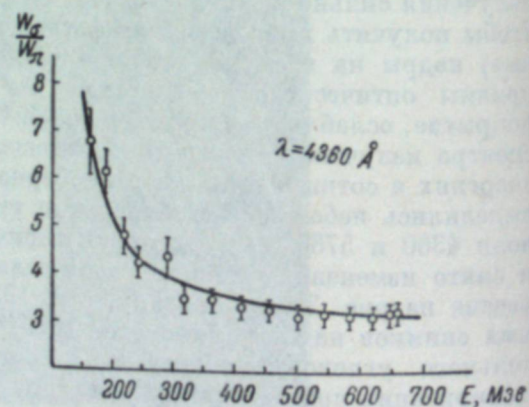


Рис. 4. Зависимость отношения интенсивностей в компонентах поляризации излучения электронов W_σ / W_π от энергии E .

Сплошная линия — теоретический ход зависимости.

нены для процесса ускорения электронов в синхротроне ФИАН им. П. Н. Лебедева на 680 Мэв.

Для колебательных процессов, сопровождающих движение электронов в ускорителях, время движения электронов в магнитном поле имеет очень существенное значение. Дело в том, что при весьма высокой энергии ускоряемых электронов на колебательное движение их влияет два противодействующих фактора, обусловленных излучением электронами квантов электромагнитной энергии. Наличие мощного электромагнитного излучения при движении электронов в магнитном поле ускорителя приводит к возникновению сил так называемого радиационного трения, которые, в свою очередь, вызывают, как это впервые было показано А. А. Коломенским и А. Н. Лебедевым [7], экспоненциальное затухание с течением времени амплитуд колебаний электронов. С другой стороны, при достаточно высокой энергии электронов (порядка нескольких сотен Мэв) должно наблюдаться возникновение новых колебаний, обусловленных квантовой природой излучения фотонов движущимися электронами, как это было впервые показано А. А. Соколовым и И. М. Терновым [8]. Поэтому, чем больше будет время движения электронов и чем выше будет их энергия, тем сильнее должно сказаться действие обоих указанных факторов на колебаниях электронов, а в нашем случае — на размерах наблюдаемого сечения сгустка. Применяя скоростное фотографирование излучения электронов и указанный выше метод обработки полученного фильма, впервые удалось установить реальные законы изменения амплитуд как вертикальных, так и радиальных колебаний электронов в синхротроне и сравнить их с теоретическими предсказаниями. На рис. 5 показано сравнение теоретических и экспериментальных данных для процесса изменения среднеквадратичных амплитуд вертикальных колебаний электронов. В момент начала регистрации излучения экспериментальное и теоретическое значения амплитуд взяты одинаковыми. Как видно из рис. 5, с возрастанием магнитного поля (при этом увеличивается энергия электронов и мощность излучения) наблюдается интенсивное затухание вертикальных колебаний, обусловленное наличием «радиационного трения» (участок кривой от момента времени 0.147 сек. до 0.7 сек.). Тем самым впервые экспериментально было подтверждено существование радиационного затухания колебаний электронов в синхротроне. Следует отметить, что при исследованных нами энергиях электронов квантовая раскачка вертикальных колебаний, согласно теории [8], будет совершенно ничтожной. Для радиальных же колебаний квантовая раскачка будет приводить к заметному увеличению их амплитуды. На рис. 6 представлено сравнение теоретического и экспериментально измеренного законов изменения радиальных размеров электронного сгустка.

Как видно из рис. 6, радиационное затухание имеет место и для случая радиальных колебаний электронов. Возрастание же амплитуды радиальных колебаний в интервале времени от 0.36 до 0.7 сек., когда магнитное поле возрастает, объясняется возникновением колебаний, обусловленных квантовыми флуктуациями в излучении электронов [8]. И в этом случае эксперимент показывает совпадение с теорией. Это говорит о том, что примененный метод позволил экспериментально обнаружить еще одно фундаментальное для теории ускорителей явление: квантовую раскачку колебаний электронов в синхротроне.

Измеряя положение центра изображения сгустка светящихся электронов относительно краев кадров, можно проследить движение центра сгустка в плоскости поперечного сечения вакуумной камеры ускорителя. Эти измерения, относящиеся к определенной точке наблюдения сгустка в одном из квадрантов магнита ускорителя, имеют важное значение для контроля за движением электронов при запуске и наладке работы синхротрона.

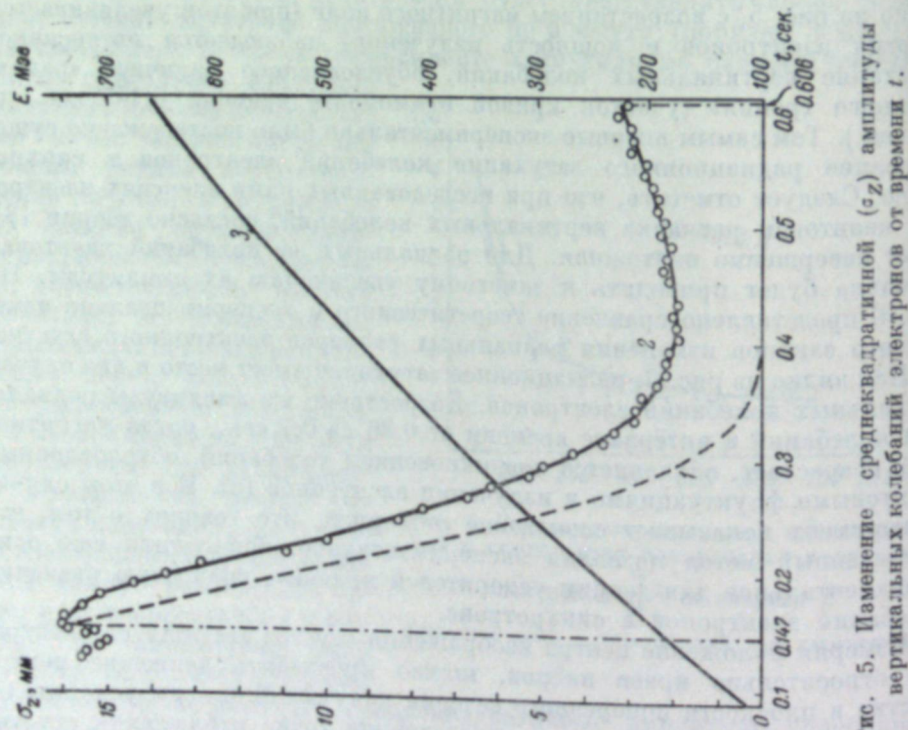


Рис. 5. Изменение среднеквадратичной (σ_z) амплитуды вертикальных колебаний электронов от времени t .

Кривая 1 — теоретически рассчитанная на основе работы [9] ход изменения амплитуды; кривая 2 — проведена по экспериментальным точкам; кривая 3 характеризует изменение энергии ускоренных электронов.

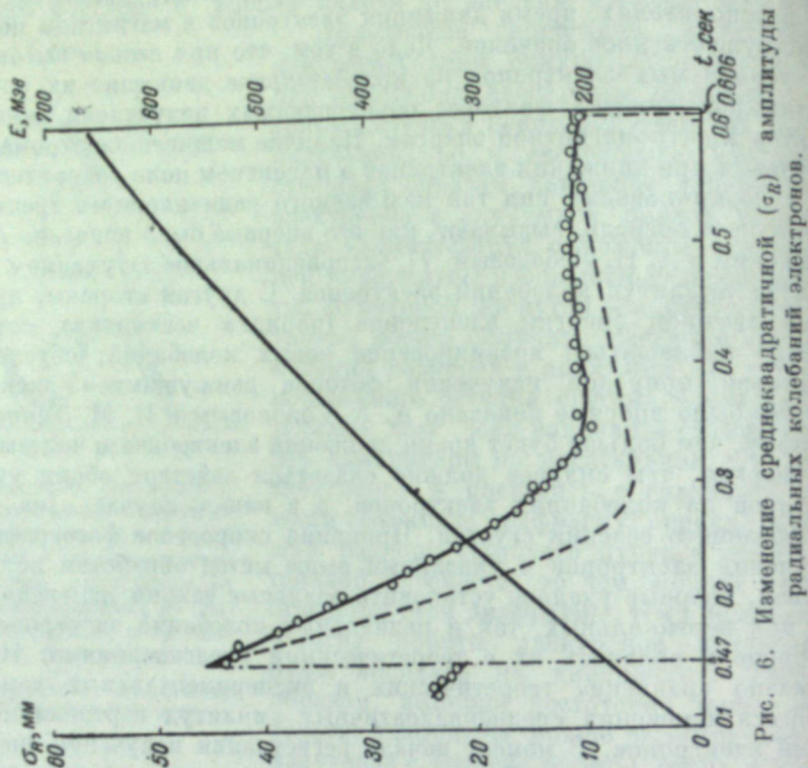


Рис. 6. Изменение среднеквадратичной (σ_R) амплитуды радиальных колебаний электронов.

Обновления кривых те же, что и на рисунке 5.

Метод наблюдения электронного сгустка, основанный на скоростной киносъемке излучения электронов, позволил не только изучить свойства этого вида излучения и установить реальные законы изменения размеров электронного сгустка, но и исследовать движение пучка электронов по сечению камеры ускорителя.

Данная работа проводилась совместно с лабораторией электронов высоких энергий Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР.

Авторы благодарят руководителя лаборатории проф. В. А. Петухова за содействие при проведении настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Д. Иваненко и И. Я. Померанчук, ДАН СССР, 44, 315, 1944.
2. Sci. News Letter, 51, 339, 1947.
3. H. Haber, Electronics, 20, 136, 1947.
4. F. R. Elder, R. V. Langmuir and H. C. Pollock, Phys. Rev., 74, 52, 1948.
5. А. А. Соколов, И. М. Тернов, ЖЭТФ, 31, 473, 1956.
6. А. А. Соколов. Введение в квантовую электродинамику. Физматиздат, 1958.
7. А. А. Коломенский, А. Н. Лебедев, ДАН СССР, 106, 807, 1956.
8. А. А. Соколов, И. М. Тернов, ЖЭТФ, 25, 698, 1953.

О. К. ЭКНАДИОСЯНЦ

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МИКРОКИНОСЪЕМКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУМАНООБРАЗОВАНИЯ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ФОНТАНЧИКЕ

Ультразвуковое туманообразование известно сравнительно давно. Уже Вуд и Лумис [1] обнаружили, что при действии достаточно мощного ультразвука на такие жидкости, как бензол, толуол, вода, над поверхностью жидкости образуется густой туман. Это явление было затем исследовано Зольнером [2], Эше [3] и др. В последнее время этот эффект успешно используется для распыления жидкостей, содержащих те или иные лекарственные вещества. Осуществляется промышленный выпуск ультразвуковых ингаляторов, оборудованы ингалятории, опубликовано довольно много работ, посвященных терапии ультразвуковыми аэрозолями. Однако ясных представлений о механизме ультразвукового туманообразования пока еще нет. Таким образом, практика опередила теорию. Предложены в весьма общих чертах две гипотезы: кавитационная [2] и волновая [3]. Каждая из них объясняет те или иные стороны наблюдаемого эффекта, однако ни та ни другая не может полностью объяснить всей совокупности наблюдаемых явлений. С целью более детального изучения механизма этого явления были поставлены

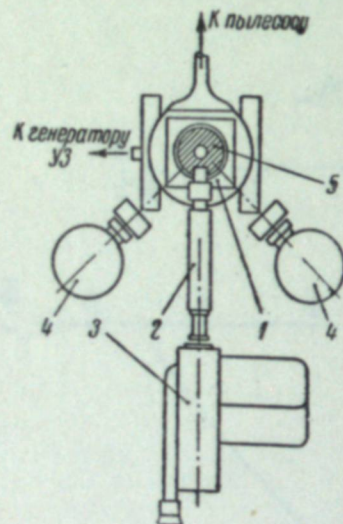


Рис. 3. Общая схема установки для микрокиносъемки.

скоростные макро- и микрокиносъемки туманообразования в ультразвуковом фонтанчике, возникающем при действии сфокусированного ультразвука на поверхность раздела жидкость—воздух. Скоростные макрокиносъемки, проведенные камерой ZL-16 с масштабом изображения на пленке 1 : 1, позволили определить структуру ультразвукового фонтанчика и границы области туманообразования. Один из кадров пленки с изображением фонтанчика представлен на рис. 1. (см. вклейку, стр. 198). Нижнюю часть фонтанчика условно назовем вспучиванием, верхнюю — струей. Струя состоит из бусинок сферической формы, вокруг нижней части струи видно белое облачко выделившегося из нее тумана.

Для съемок с большим увеличением использовалась камера СКС-1 без объектива в сочетании с тубусом и передвижной системой металлографического микроскопа типа MBT. Тубус микроскопа крепился к спе-

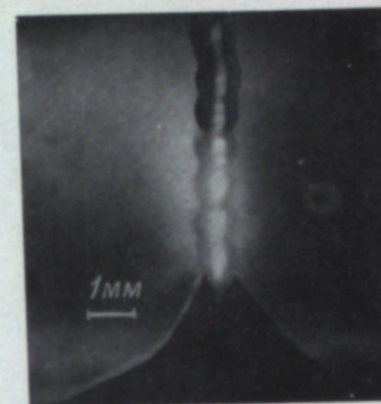


Рис. 1. Кадр с изображением фонтанчика.

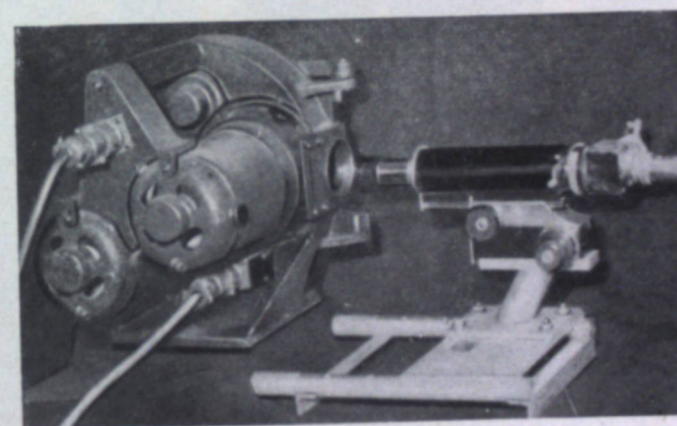


Рис. 2. Установка для микрокиносъемки.

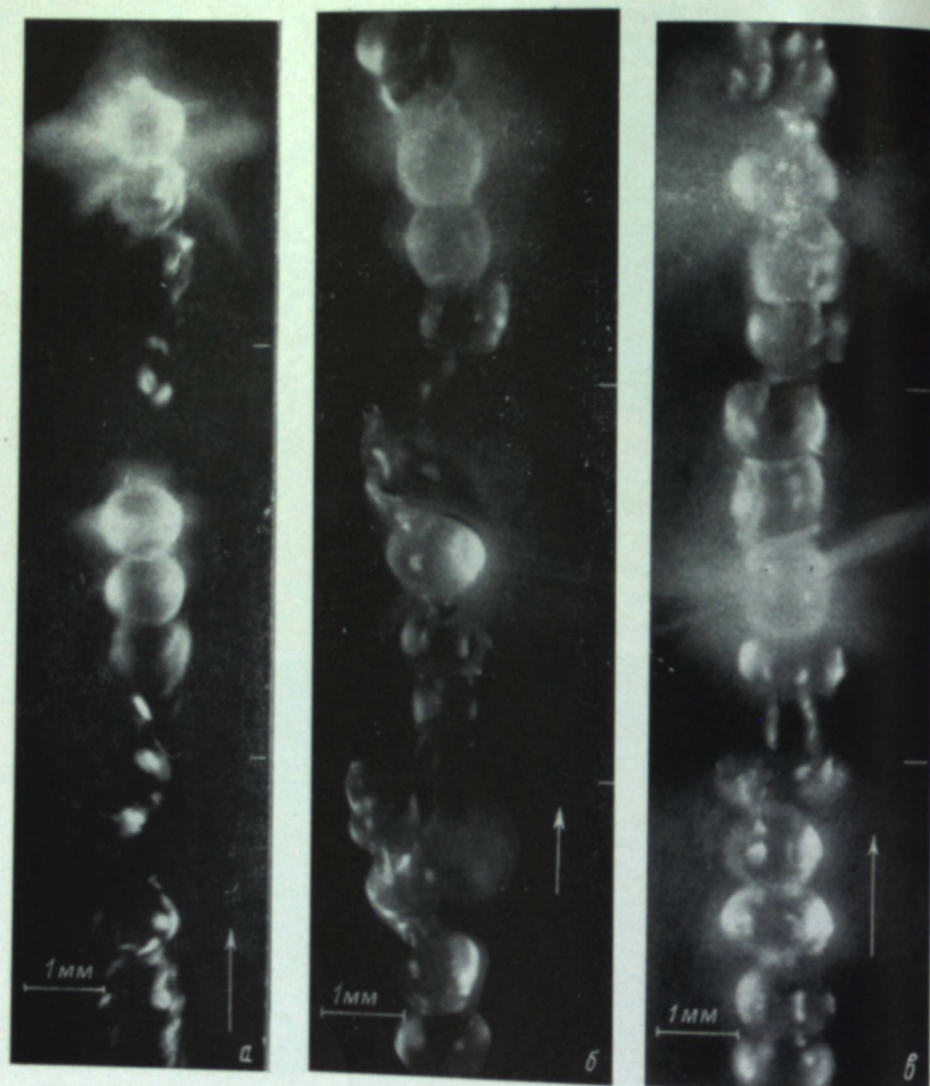


Рис. 4. Последовательные кадры с изображением взрыва бусинок.

циально изготовленному тубусодержателю, установленному на шасси (рис. 2; см. вклейку, стр. 198), которое, в свою очередь, вставлялось в гнезда универсального киностатива. В качестве объективов использовались объектив $3\times$ горизонтального микроскопа МИР-1, а также объективы $16\times$ и $22\times$ металлографического микроскопа МВТ; в качестве окуляров — фотографические окуляры $3\times$ и $4\times$ микроскопов МБМ-3 и др. Комбинируя перечисленную оптику, можно было получать увеличения изображения на пленке от $1.5\times$ до $15\times$. Масштаб изображения на пленке определялся сразу же после проведения очередной киносъемки путем съемки эталонной полоски и сравнения размера полученного изображения на пленке с истинным. Наводка на резкость и некоторое плавное изменение масштаба изображения осуществлялись с помощью грубого и точного перемещений микроскопа относительно камеры и выдвижения фотографического окуляра микроскопа. Частота съемки при номинальном напряжении на клеммах камеры доходила до 5200 кадров/сек. Общая схема установки для скоростной микрокиносъемки представлена на рис. 3, где 1 — сосуд с фонтанчиком, 2 — микроскоп, 3 — СКС-1, 4 — осветители с лампами СВДШ-250, 5 — излучатель из керамики титаната бария. С целью удаления той части образующегося тумана, которая заслоняла объект съемки, фонтанчик обдувался легкой струей воздуха из пылесоса.

Для съемок использовалась 16-мм кинопленка типа Дн и Дк. Заснятые кинопленки просматривались на стандартном аппарате для чтения микрофильмов и на экране, как кинофильмы, с помощью кинопроектора «Украина».

С помощью скоростной микрокиносъемки были получены интересные новые результаты. Оказалось, что визуально наблюдаемый непрерывный процесс туманообразования на самом деле имеет импульсный характер. Туман выбрасывается из струи редкими кратковременными (< 400 мсек.) взрывами, промежутки между которыми значительно больше продолжительности взрывов. Взрыву бусинок струи, как правило, предшествует их посветление, как это видно, например, на рис. 4, а (см. вклейку, стр. 199). На этом и последующих снимках стрелкой показано направление развития процесса во времени; кадры отделены друг от друга белыми черточками справа. На рис. 4, б можно проследить за развитием небольшого участка посветления, охватившего затем всю поверхность бусинок перед взрывом. Форма выбросов тумана разнообразна: так, например, на рис. 4, в туман выбрасывается из бусинок в виде узких струй, направленных во все стороны. Наряду с туманом выбрасываются и сравнительно крупные капельки жидкости. В числе прочих явлений обнаружены пульсация струи, появление на ее поверхности линейчатой структуры и коагуляция уже выброшенного тумана. Установлена качественно зависимость описанных явлений от мощности ультразвука.

В результате покадровой обработки негативного материала построены кинограммы движения струи, капелек и порций тумана. На рис. 5 представлен график зависимости расстояний, пройденных каплями (прерывистая линия) и порциями тумана (сплошная линия), от времени. Из графика легко вычислить скорости вылета из струи крупных капелек жидкости и порций тумана.

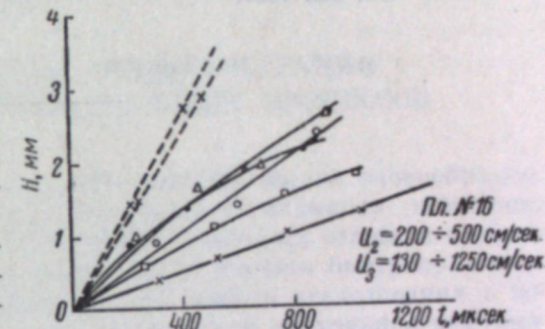


Рис. 5. График зависимости расстояний, пройденных каплями (прерывистая линия) и порциями тумана (сплошная линия), от времени.

В результате проведенных высокоскоростных микрокино съемок выявлена качественно картина и кинетика туманообразования в ультразвуковом фонтанчике.

Работа была выполнена в Лаборатории ультразвука Акустического института АН СССР под руководством проф. Л. Д. Розенберга.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. W. Wood, A. L. Loomis. The physical effects of high frequency sound waves of great intensity. Phil. Mag. 4, 7, 417—436, 1927.
2. K. Sollner. The mechanism of the formation of fogs by ultrasonic waves. Trans. Faraday Soc., 32, 187, 1532—1536, 1936.
3. Esche. Erzeugung von hochwertigen Aerosolen mittels Ultraschall. Communications du congrès international sur les traitements par les ultra-sons, Marseille, 179—183, mai 1955.

В. В. ГАРНОВ

СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ ФОТОРЕГИСТРАЦИЯ НЕКОТОРЫХ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

Методы изучения физических свойств вещества весьма разнообразны. Надежными средствами в руках исследователей являются оптические и фотографические методы, особое место среди которых занимает высокоскоростная фотография, дающая возможность изучать быстропротекающие процессы. Как известно, объективность любого исследования в конечном счете определяется качеством и количеством полученной информации. Современный уровень высокоскоростной фотографии уже сейчас позволяет получить обширные материалы при исследовании различных физических явлений. Но все же необходимо отметить, что потенциальные возможности этого метода далеко не исчерпаны. И в настоящее время, используя существующую аппаратуру, можно получить значительно большее количество информации. Следует указать на два направления, которые могут дать значительные результаты — это использование высокоскоростной стереоскопической съемки и применение цветных фотоматериалов. Стереоскопическая съемка дает объемную картину исследуемого процесса, при этом фотографическое разрешение стереопар повышается по сравнению с обычной съемкой в 1.5—2 раза. Кроме того, значительно возрастает дешифрируемость снимков.

Особенно эффективно совместное применение стереоскопической и цветной фотографии. Необходимо также отметить, что эти методы вполне доступны широкому кругу исследователей, что также является их положительным качеством.

В настоящей статье рассматриваются некоторые работы по стереоскопической съемке, проводившиеся в Институте химической физики АН СССР при исследовании быстропротекающих процессов.

Вначале рассмотрим необходимые условия для получения стереопар. При высокоскоростной стереоскопической съемке, помимо выполнения известных фотограмметрических условий [1, 2, 3], приходится учитывать ряд требований, обусловленных исследованием быстропротекающих процессов.

Для получения высококачественного изображения необходимо полностью использовать фотографическое разрешение оптической системы. Для этого необходимо, чтобы смазывание в плоскости изображения не превосходило фотографического разрешения. Это может быть достигнуто при выполнении известной зависимости, связывающей основные параметры съемки:

$$t_{\text{эк}} \leq \frac{1}{0.7NMv}, \quad (1)$$

где $t_{\text{эк}}$ — время экспонирования, M — масштаб съемки, v — скорость исследуемого процесса, N — фотографическое разрешение оптической системы в линиях на мм.

При стереоскопической съемке желательно, чтобы это условие в первую очередь выполнялось для скоростей, имеющих направление, параллельное базису съемки, так как точность измерения поперечных параллаксов зависит от фотографического разрешения в этом направлении. Другим необходимым требованием является одновременность экспонирования стереопар, что достигается синхронной работой затворов фоторегистрирующих камер. Одновременно экспонированными можно считать кадры, моменты экспозиций которых совпадают или отличаются на некоторое допустимое время рассинхронизации Δt_p , которое не вносит ошибок, влияющих на точность измерения поперечных параллаксов [2].

Если при измерении стереопар точность наведения марки ограничивается фотографическим разрешением снимков, то допустимое время рассинхронизации можно определить из следующего выражения:

$$\Delta t_p \leq \frac{L}{0.7BMvN_{\text{ст}}}, \quad (2)$$

где L — расстояние до объекта съемки, B — базис съемки, $N_{\text{ст}}$ — стереоскопическое разрешение эмульсии.

Синхронизация при стереоскопической съемке может осуществляться различными способами, которые в основном определяются условиями эксперимента и требованиями, вытекающими из условия (2). Отметим некоторые способы синхронизации, использованные в наших работах. При съемках с близких расстояний, когда размер базиса съемки невелик (до ~ 1 м), удобно применять камеры со стереоскопическими приставками [4]. При больших расстояниях до объекта съемки необходимо увеличивать и размер базиса. В этом случае применялись две камеры, находящиеся на концах базиса съемки. Если достаточно иметь базис 1.5—3 м при скоростях исследуемого процесса до 100—150 м/сек., то можно использовать механическую связь кинематических устройств камер. Камеры в этом случае могут приводиться в движение одним двигателем. Синхронизация выполняется жестко в пределах ошибок кинематических пар. При больших скоростях исследуемых процессов и больших базисах фотографирования удобно применять электрическую связь.

Используя средства автоматики, можно осуществить синхронизацию с высокой точностью. Основное препятствие использования этого метода, если он уже предусмотрен в конструкции (как например, в СФР-2М), заключается в необходимости создания сложной и дорогой электронной аппаратуры.

При больших базисах съемки, применяя киносъемочные камеры с прерывистым транспортированием киноплёнки, и скоростях исследуемого процесса до 100—150 м/сек. можно получить стереопары, задаваясь строго определенными частотами съемки каждой камеры, используя принцип, близкий к «биению частот». В этом случае происходит наложение частот и совпадающие кадры дают стереопары.

Рассмотрим некоторые случаи стереоскопической съемки при исследовании быстропротекающих процессов.

При изучении быстропротекающих процессов, таких, как выброс грунта при подземном взрыве, для определения траектории отдельных частей грунта была использована стереоскопическая съемка. Для съемки применялись модернизированные кинокамеры типа КС-2. Из условий проведения эксперимента безопасное расстояние для съемки — 80—100 м. Базис съемки при этом лежал в пределах 8 ÷ 15 м. Для получения одновременно экспонированных кадров (стереопар) использовался метод синхронной работы камер, заключающийся в том, что одновременность

экспонирования достигалась путем частотной связи между камерами. Сущность этого метода основана на следующих положениях. Синхронная работа камер a и b показана на рис. 1. Если камеры работают с различными частотами съемки, то для них всегда можно подобрать такие частоты, отношение которых представляет собой отношение целых чисел, не имеющих общих множителей; тогда кадры, кратные этим частотам, будут совпадать (рис. 1, II). Как видно из этого рисунка, для строгого совпадения в этом случае требуется выполнение условия:

$$kt_1 = mt_2; \quad m = \frac{kt_1}{t_2}; \quad k = \frac{mt_2}{t_1},$$

где t_1 — межкадровое время камеры a , k — номер совпадающего кадра камеры a , t_2 — межкадровое время камеры b , m — номер совпадающего кадра b .

Задаваясь целыми значениями k , получим ряд значений m (целых и дробных). Целые значения m из этого ряда укажут номера совпадающих кадров камеры b . При этом совпадающие кадры будут относиться друг к другу как отношения частот съемки:

$$\frac{k}{m} = \frac{t_2}{t_1} = \frac{n_1}{n_2}.$$

В этом случае только совпадающие кадры дадут стереопары. Общая частота стереоскопической съемки будет меньше частоты съемки отдельных камер и определится как

$$n_{\text{ст}} = \frac{n_1}{k_1} = \frac{n_2}{m_1} = \frac{1}{m_1 t_2} = \frac{1}{k_1 t_1},$$

где k_1 и m_1 — номера первых совпадающих кадров.

Выше был рассмотрен случай, когда камеры начинали работать одновременно с совпадающих кадров. При независимой работе камер первые кадры могут не совпадать и находиться в любом месте интервала межкадрового времени t_1 или t_2 . Тогда возможны случаи, когда строгого совпадения кадров не будет, но при этом общая картина сохранится, так как время несовпадения кадров будет мало по сравнению с межкадровым временем (рис. 2). Максимальное несовпадение кратных кадров, т. е. время их рассинхронизации $\Delta t_{\text{рх}}$, определяется как

$$\Delta t_{\text{рх}} = \frac{1}{2m_1 n_1} = \frac{1}{2n_2 k}. \quad (3)$$

Эта зависимость строго доказывается при помощи теорем из теории чисел, а также может быть получена путем анализа графических изображений различных вариантов несовпадений первых кадров при различных отношениях частот съемки:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{t_2}{t_1} = \frac{k}{m} = \frac{2}{3}; \frac{3}{4}; \frac{4}{5}; \frac{5}{7}; \frac{7}{8},$$

и т. д.

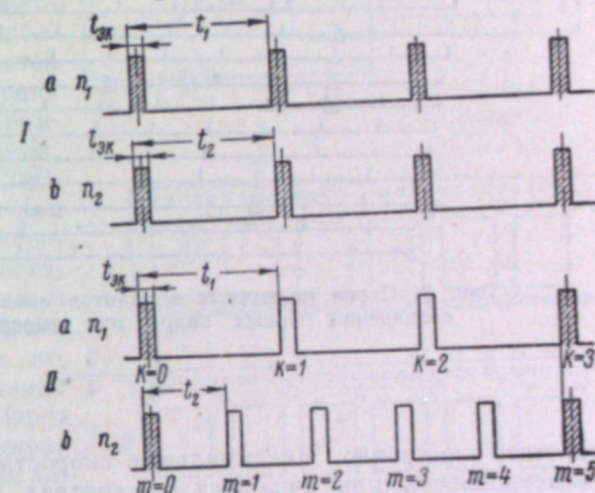


Рис. 1. Схема синхронно работающих камер.

Если время рассинхронизации $\Delta t_{\text{рн}}$ будет

$$\Delta t_{\text{рн}} \leq \frac{L}{0.7BNvM},$$

т. е. будет лежать в пределах допустимого времени рассинхронизации, определенного по формуле (2), то можно считать, что камеры будут

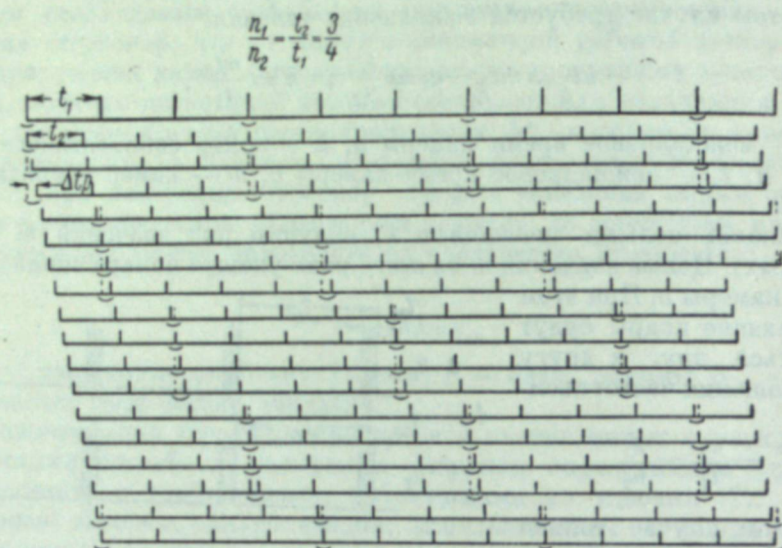


Рис. 2. Схема различных вариантов наложения частот при несовпадении первых кадров при отношении частот съемки

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{3}{4}.$$

работать синхронно. Максимальные скорости процесса, которые можно регистрировать при заданных параметрах съемки, определяются как

$$v \leq \frac{2m_1 n_1 Y}{0.7BNM} = \frac{2n_2 k_1 Y}{0.7BNM}.$$

Общее количество стереопар (при $v = \text{const}$) определяется как

$$\Sigma = \frac{n_1 T}{k} = \frac{n_2 T}{m},$$

где T — общее время съемки.

Для быстрого нахождения стереопар в приборах предусмотрен отметчик (рис. 3), который впечатывает световые метки I на пленку 2 при одновременно открытых затворах 3. При небольшом количестве кадров стереопары удобно находить по увеличенным отпечаткам. Разница в размерах изображения (при одинаковом масштабе съемки), лежащая в пределах фотографического разрешения, лежащая в пределах соответственно возрастает, и стереопары легко определяются простым измерением. Так как скорости исследуемых процессов бывают обычно неравномерными, а расчет допустимого времени рассинхронизации ведется по максимальным скоростям, то практически количество стереопар бывает больше расчетного.

В результате съемки таким методом были получены стереопары, по которым построены траектории разлета отдельных участков грунта с точностью до $1/700$ от расстояния до эпицентра. Параметры исследуемых процессов и съемки были следующие.

Вес заряда взрывчатого вещества $50 \div 100$ кг, глубина заложения $1.5-3$ м, скорость разлета грунта $40 \div 100$ м/сек. Для обеспечения условий получения стереопар точность поддержания частоты съемки должна быть не менее $0.5-1\%$.

При исследовании быстропротекающих самосветящихся процессов небольшой мощности, которые обычно изучаются в лабораторных условиях, для стереоскопической съемки удобно применять стереоскопическую приставку с прибором типа СФР-2М.

Стереоскопическая приставка, разработанная для луп времени с коммутацией изображения, построена на принципе их многоканальности, что дает возможность использовать полный кадр камеры для получения отдельного снимка стереопары.

Принцип работы стереоскопической приставки с прибором типа СФР-2М заключается в следующем (рис. 4, а). В лупах времени, работающих по принципу коммутации изображения, и, в частности, в приборе СФР-2М [5] исследуемый объект при помощи объективов 3 и 3' строится в некоторой плоскости, совпадающей с рабочей гранью вращающегося зеркала 5. Далее изображение при помощи отдельных линз линзовой вставки строится на пленке 7. Перед входным объективом помещена двухступенчатая апертурная диафрагма 2. Изображение каждой ступени этой диафрагмы строится соответственно на линзах

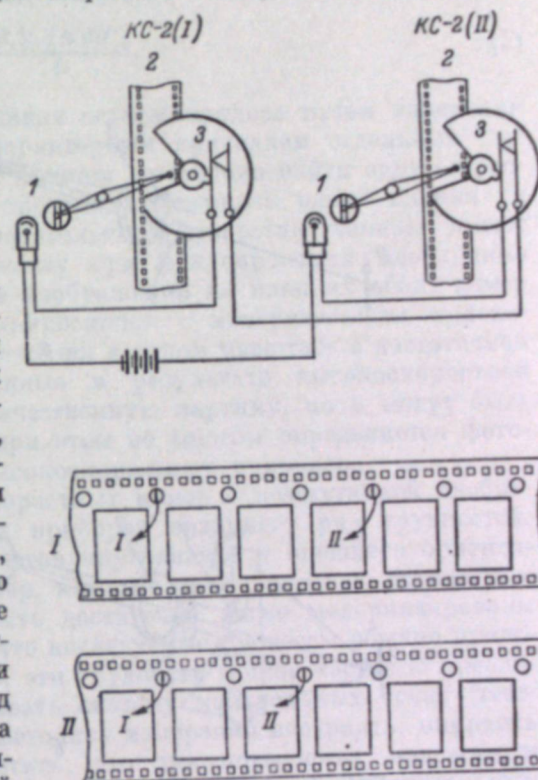


Рис. 3. Схема отметчика стереопар.

первого и второго ряда линзовой вставки 6. При замене ступенчатой диафрагмы 2 (рис. 4, а) диафрагмой 2 (рис. 4, б), в которой световые отверстия расположены на одной вертикальной линии, экспонирование кадров на пленке в каждом вертикальном ряду будет происходить одновременно.

Если световые окна такой диафрагмы при помощи специальной стереоскопической приставки 1, состоящей из системы призм и зеркал, разнесены на некоторое расстояние B (базис съемки), то при фотографировании двумя каналами кадры O''_1 и O''_2 , полученные на пленке в вертикальном ряду, будут сфотографированы строго одновременно и с некоторым базисом B . Каждая пара кадров в вертикальном ряду будет являться стереопарой. Максимальная частота стереоскопической съемки возможна до $1\,250\,000$ сек.⁻¹. Такая приставка в сочетании с прибором СФР-2М дала возможность получить черно-белые и цветные стереоскопические негативы.

При исследовании процессов детонации зарядов взрывчатых веществ с весом до 200 кг использовались две камеры типа СФР-2М ($f_k = 70$ или 210 мм), которые устанавливались на концах базиса (7—10 м) и работали синхронно с частотой съемки до $625\,000$ сек.⁻¹. Съемка обычно производилась с некоторыми углами конвергенции. Расстояние от приборов до эпицентра было $50 \div 100$ м. При съемке двумя приборами типа СФР-2М для синхронной работы приборов использовался предусмотренный в элек-

трической схеме управления принцип, который позволяет инициировать взрыв только при определенных положениях развращающихся зеркал на обеих камерах.

Для согласования момента подачи инициирующего импульса с положением зеркала камеры над зеркалом расположен электромагнитный датчик. При вращении зеркала, проходя под сердечником датчика, замыкает его магнитную цепь, а в катушке датчика индуцируется ЭДС в виде

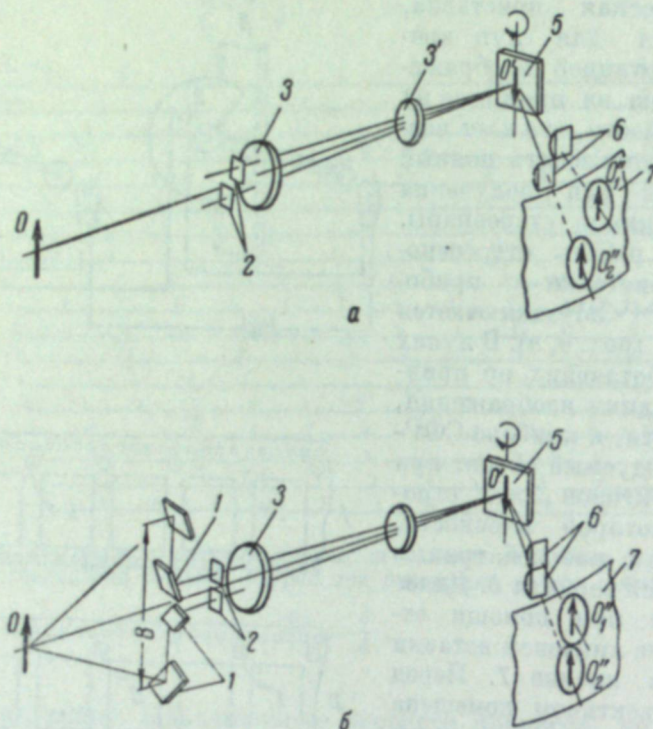


Рис. 4. Принципиальная оптическая схема прибора СФР-2М, работающего без приставки (а) и со стереоскопической приставкой (б).

кратковременного импульса, который подается на зажигание инициирующего тиратрона. В режиме синхронной работы тиратроны обеих камер заблокированы так, что только при одновременном поступлении импульсов с электромагнитных датчиков они выдают инициирующий импульс на подрыв заряда.

Устанавливая датчики в определенном положении над зеркалом, можно получить кадры на обеих камерах, экспонированные одновременно. Такая установка достаточно трудоемкая и требует много времени, а недостаточная хорошая воспроизводимость совпадений от опыта к опыту ввиду изменений параметров электрических цепей под влиянием окружающей среды вынуждает перед каждым опытом повторять подгонку, что лишает метод необходимой гибкости. Несовпадение кадров не дает возможности получить строгие стереопары. Для того чтобы не производить подгонку совпадающих кадров перед каждым опытом при большом количестве экспериментов, можно задаться условиями съемки, при которых максимально возможное несовпадение кадров не отразится на качестве стереопар.

В приборе СФР-2М межкадровое время равно полному времени экспонирования (коэффициент скважности $\mu=1$), следовательно, максимальное

время рассинхронизации (при $n_1=n_2$) может быть не более половины времени экспонирования

$$\Delta t_{\text{рм}} = \frac{t_{\text{эгр}}}{2} = \frac{1}{2n}. \quad (4)$$

Пользуясь выражениями (2) и (4), можно определить параметры съемки, при которых смещение кадров не будет влиять на качество стереопар

$$n \geq \frac{0.35BMvN_{\text{ст}}}{L}. \quad (5)$$

Нахождение стереопар на пленках осуществлялось путем измерения размеров изображения или по характерным признакам отдельных стереопар, которые обычно имеются. При этом достаточно найти одну стереопару, а остальные определяются простым наложением одной пленки на другую. Ввиду небольшого относительного отверстия камеры имеют большую глубину резкости, поэтому при фокусировании необходимо обращать внимание на получение изображений на пленках обеих камер в одном масштабе. Пользуясь микроскопом с измерительным приспособлением, легко получить изображения в одном масштабе с достаточной точностью. Стереопары, полученные в результате высокоскоростной стереосъемки, дают не только качественную картину, но и могут быть измерены. Точность измерения при этом во многом определяется фотограмметрическими свойствами высокоскоростных приборов.

При использовании высокоскоростных камер с коммутацией изображения как фотограмметрических приборов возникает ряд трудностей, связанных с определением элементов внутреннего и внешнего ориентирования. Приборы типа кинокамер, которые имеют простую оптическую схему и конструкцию, могут быть достаточно легко модернизированы в этом направлении. Учитывая, что исследуемые процессы обычно происходят в небольшом пространстве, эти трудности можно частично преодолеть, если эффективно использовать систему контрольных точек (тест-объектов) и направлений, а всю методику измерений построить, опираясь на них. Необходимо также отметить, что для повышения надежности и точности измерений и удобства обработки наиболее предпочтительным является нормальный случай стереосъемки. При стереоскопической съемке с целью измерений предварительно производилось фотографирование объемного тест-объекта в пространстве, где должен происходить исследуемый процесс. С этими же установочными данными осуществлялась фоторегистрация исследуемого процесса. Увеличенные отпечатки стереопар с изображением тест-объекта и исследуемого процесса обрабатывались, причем масштаб параллаксов и искажения стереомодели исследуемого процесса определялись и учитывались путем измерения пространственной модели тест-объекта.

В некоторых случаях удобно экспонировать изображение исследуемого процесса и изображение тест-объекта без перематки пленки (в приборах СФР-2М), что дает изображение тест-объекта с объектом съемки на одном и том же кадре. При подземных взрывах на выброс использовалась система контрольных реек, установленных в зоне взрыва и имеющих определенные координаты.

Полученная стереомодель может измеряться как упрощенными, так и точными способами. Исходя из поставленных задач, необходимо выбрать и способ измерения. Как показала практика, при высокоскоростной съемке часто бывает вполне достаточной точность измерений, получаемых при помощи простых и легко доступных средств, особенно при измерениях с целью дешифрирования. При упрощенных способах измерения применялся зеркально-линзовый стереоскоп с пластинками профессора Ф. В. Дробышева. Небольшое усовершенствование пластины повышает

точность измерения параллаксов и в нашем случае позволяло производить измерения с относительной точностью до $1/500$ от L .

При точных измерениях удобно пользоваться стереометром типа СМ-4, который позволяет измерять параллаксы с большей точностью и автоматически вводить поправки за ошибки ориентирования [6].

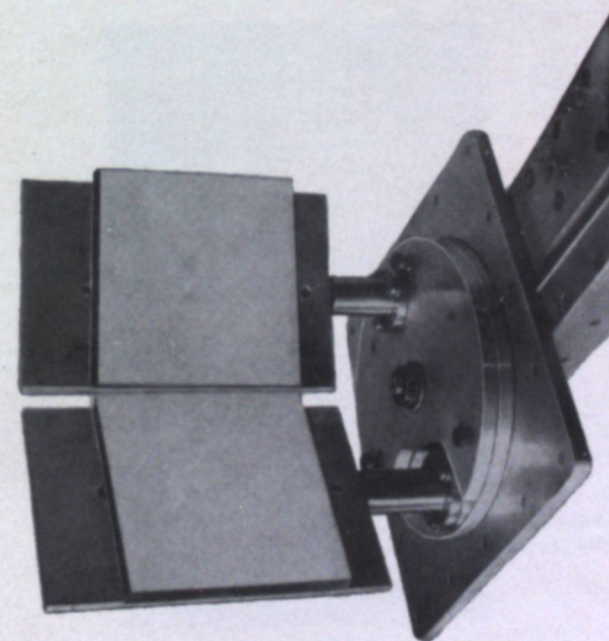
В этом случае относительная точность измерения может быть значительно повышена. Для облегчения обработки были составлены номограммы, которые позволяли графически определить превышения и координаты точек по измеренным параллаксам.

Выбор оптимального значения базиса съемки исходит из основных положений стереофотограмметрии с учетом условий эксперимента. Стереоскопическая съемка быстротекущих процессов позволила получить объемное изображение и измерить его. С негативов, полученных в результате съемки, были также сняты цветные стереоскопические фильмы, что дало возможность изучать динамику развития процесса в цветах, близких к натуральным.

Все это обеспечило получение большого количества информации при изучении детонации взрывчатых веществ и дало новые качественные представления о разлете продуктов взрыва.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Скиридов. Стерефотограмметрия. Геодезиздат, М., 1951.
2. А. Н. Лобанов. Фототопография. Геодезиздат, 1960.
3. Р. Финстервальдер. Фотограмметрия. Геодезиздат, 1959.
4. В. В. Гарнов, А. С. Дубовик, ЖН и ПФиК, т. 5, № 5, 1960.
5. И. А. Черный, Оптико-механическая промышленность, № 3, 18, 1957.
6. Ф. В. Дробышев. Основы аэрофотосъемки и фотограмметрии. Геодезиздат, 1955.



К ст. А. А. Кукиного и др.,
стр. 209.

Зеркальная стереоприставка в камере СКС-1.

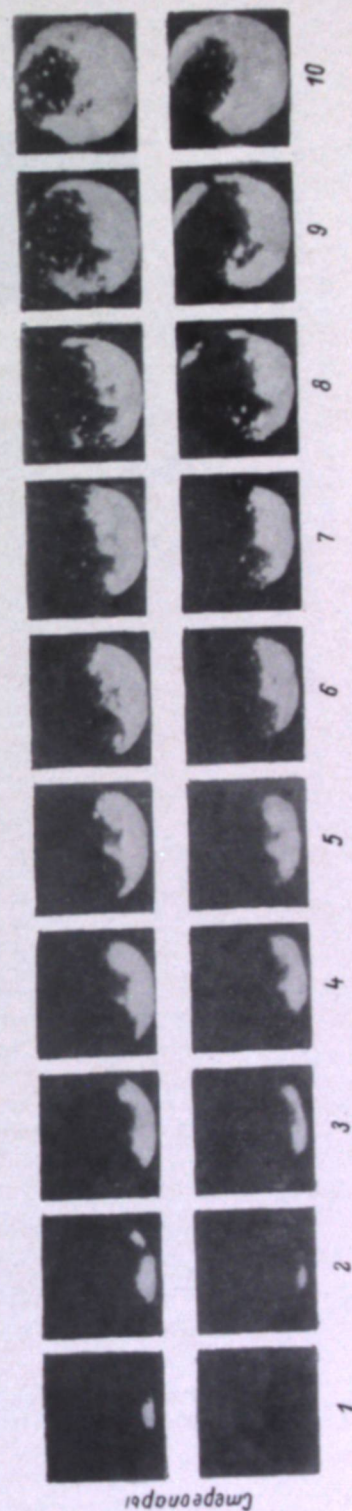


Рис. 4. Стереofilм процесса сгорания в бомбе.

К ст. Ю. Б. Свиридова и др.,
стр. 211.

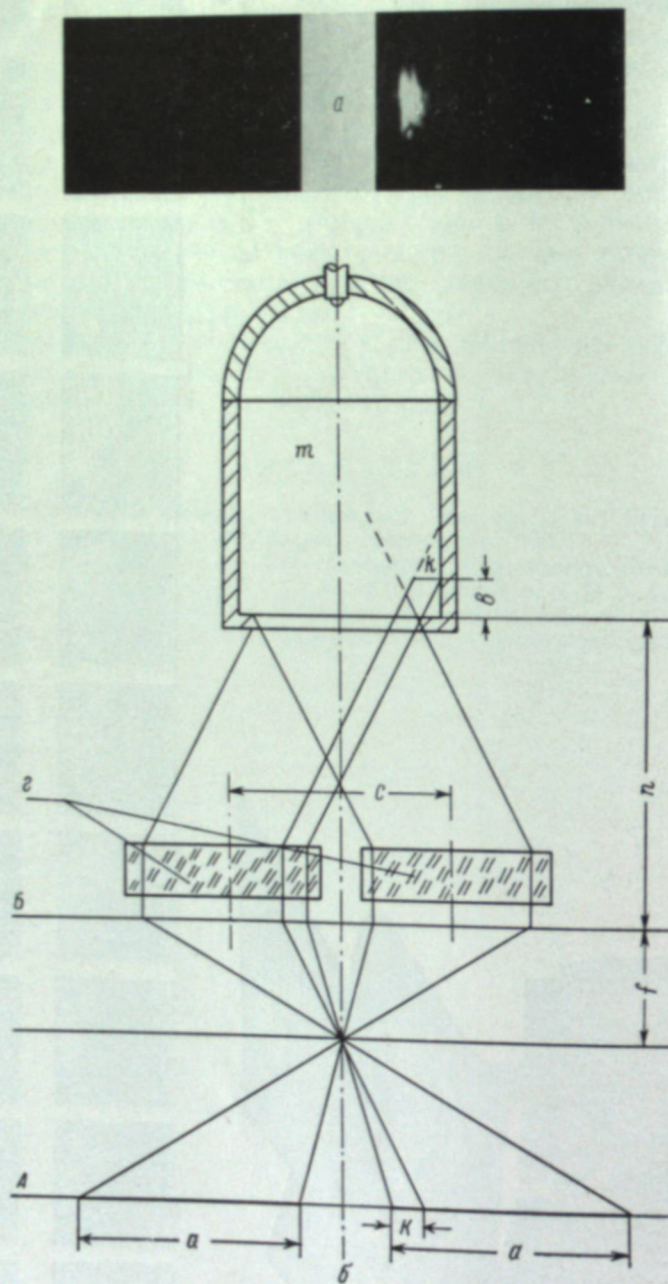


Рис. 2. Схема определения места очага воспламенения в объеме камеры сгорания (б) по двум кадрам стереопары (а).

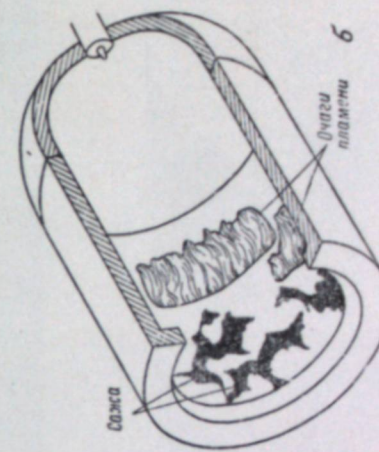
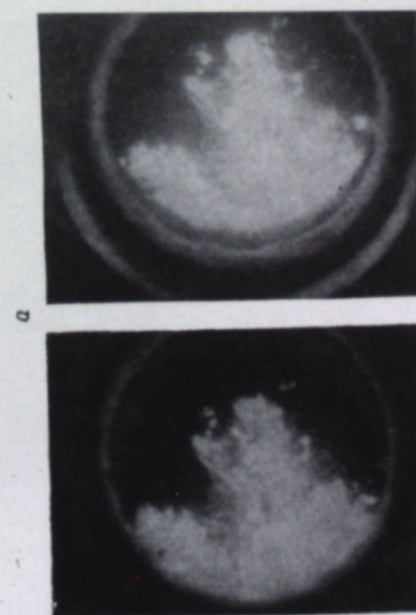
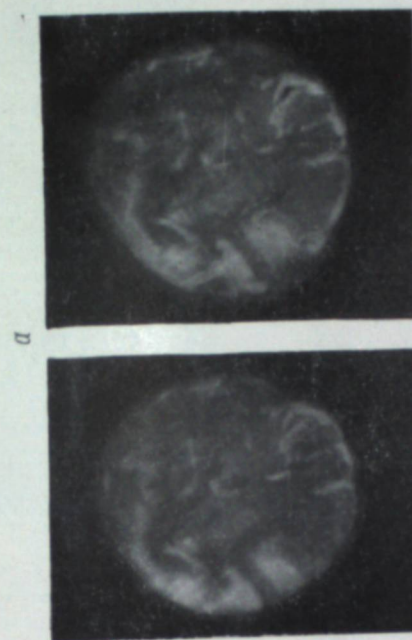


Рис. 4. Изображение очагов пламени (стадия догорания) в объеме камеры сгорания (б), построенное по данным стереопары (а).

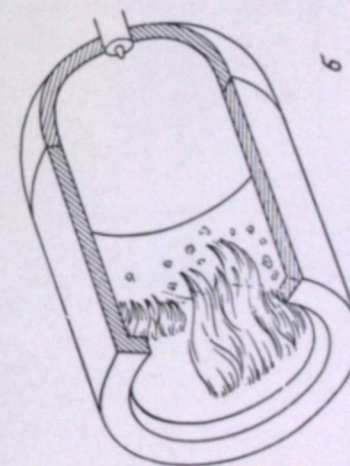


Рис. 3. Объемное изображение очага пламени в камере сгорания (б) по данным стереопары (а).



Рис. 2. Детонационная волна в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$.

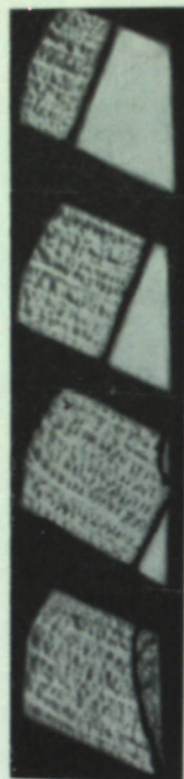


Рис. 3. Регулярное отражение детонационной волны.



Рис. 4. Нерегулярное отражение детонационной волны.



Рис. 5. Преломление детонационной волны при переходе из $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ в $\text{CH}_4 + 3.5\text{O}_2$.

А. А. КУКИБНЫЙ, В. А. СМОРОДИН

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ СТЕРЕОКИНОСЪЕМКА СВОБОДНОГО ПОЛЕТА ЗЕРЕН

В ряде отраслей сельского хозяйства СССР применяются метательные машины, которыми перебрасываются обрабатываемые зерновые материалы.

Для точного определения положения и поведения зерен в пространстве, выявления характера и причины отклонения летящих зерен от вертикальной плоскости их бросания, а также изучения ряда других важных вопросов были произведены скоростные стереокиносъемки свободного полета зерен камерой СКС-1.

Нами был принят метод получения стереоизображений с помощью зеркальной приставки, состоящей из двух плоских зеркал с наружным покрытием, размером 100×100 мм каждое (рисунок, см. вклейку, стр. 208). Приставка расположена по отношению к оси объектива ($F=50$ мм) под углом $45-50^\circ$. Угол между зеркалами близок к 170° . Изменением угла взаимного расположения зеркал и расстояния от зеркал до объектива можно в достаточных пределах менять базис съемки и проводить киносъемку малых объектов при оптимальных условиях.

Применение зеркальной стереоприставки позволяет оптическим путем получать на киноплёнке шириной 16 мм два изображения размером 7.5×5.0 мм с вертикальным расположением кадра, с достаточной разрешающей способностью. Полученные стереопары обрабатывались в обычных условиях, затем печатались на позитивной плёнке и демонстрировались проектором типа 16 НП (с объективом $F=50$ мм).

Для раздельного восприятия правых и левых изображений, соответственно для правого и левого глаза, применялась проекция на небольшой матовый просветный экран и просмотр спроецированных стереопар через обычный линзовый стереоскоп, жестко установленный перед экраном.

Проведенные экспериментальные съемки и просмотры стереопар мелких объектов свидетельствуют о том, что примененные приспособления вполне себя оправдывают, когда нет необходимости демонстрировать изображение большому числу зрителей.

Ю. Б. СВИРИДОВ, Е. В. ШАТРОВ

ПРИМЕНЕНИЕ СКОРОСТНОЙ СТЕРЕОКИНОРЕГИСТРАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССОВ СГОРАНИЯ

В настоящее время один из основных методов исследования процесса сгорания в двигателях является метод скоростного фотографирования пламени.

Учитывая, что процесс сгорания в двигателях осуществляется посредством распространения фронта пламени, регистрация его развития во времени и пространстве поможет понять основные закономерности, управляющие его распространением, а следовательно, и процессом сгорания вообще. Фотографирование позволяет наблюдать быстротекающие процессы, которые невозможно видеть невооруженным глазом. Большую роль в развитии этого метода исследования сыграло создание скоростных и сверхскоростных кино съемочных камер различных конструкций.

Основной целью применения скоростной кино съемки в настоящей работе было определение места образования начального очага пламени в камере сгорания, а также характера и скорости его распространения на смежные области топливо-воздушного заряда. Скоростная кино регистрация была применена для изучения указанных явлений на специальной установке — дизельной бомбе постоянного объема, которая представляет собой цилиндр диаметром 80 мм с полусферической крышкой с одной стороны и оптически прозрачным стеклом — с другой. В полусферической крышке вмонтированы топливоподающая и измерительная аппаратура. Общая глубина камеры сгорания составляет 120 мм. Кино съемочная камера располагается на расстоянии 0.5 м от бомбы.

Исследование сгорания в бомбе проводилось с помощью скоростной кино съемочной камеры АЕГ, позволяющей вести съемку с частотой до 80 000 кадров/сек. Съемка процесса сгорания проводилась в зависимости от температурного режима с частотой от 500 до 2000 кадров/сек. Размер получаемых при этом кадров соответственно был равен 18×24 мм и 9×24 мм. Выдержка в том и другом случае была не менее 103×10^{-6} сек. Работа кинокамеры была полностью синхронизирована с автоматикой управления установки.

Полученные фильмы процессов сгорания моторных топлив позволили определить скорость распространения пламени (его проекции) и место возникновения очага воспламенения, но не в объеме, а условно, лишь в плоскости.

Исследования, проведенные в Лаборатории двигателей АН СССР, показали, что еще большие возможности для изучения процессов сгорания открываются при применении стереоскопической кино съемки и стереоскопического фотографирования пламени.

Учитывая преимущества объемной фотографии, была проведена скоростная стереокино съемка процессов сгорания моторных топлив в бомбе.

Стереоскопический метод исследования был применен для изучения различных фаз процесса сгорания неоднородных смесей в условиях, близких к реальным. Стереосъемка позволила решать ряд неясных вопросов, связанных как со структурой фронта пламени и факела, так и более общих вопросов процесса сгорания; этот метод помог достаточно точно определить место расположения очага воспламенения в объеме камеры сгорания, дал более совершенное представление о характере и форме фронта пламени, а также позволил увидеть объемное развитие процесса в динамике.

Стереосъемка проводилась той же кино съемочной камерой АЕГ с частотой до 2000 кадров/сек. с использованием кино пленки типа ДН и ДК. Для получения стереопары на пленке объектив кино съемочной камеры ($F=75$ мм; $1:2$) был снабжен специальной призматической стереоприставкой со съемочным базисом, равным 60 мм. Расстояние от камеры до бомбы оставалось прежним 0.5 м. Размеры каждого кадра стереопары при частоте съемки 1000 и 2000 кадров/сек. были соответственно равны 18×12 и 9×12 мм.

Полученный экспериментальный материал дал возможность убедиться в преимуществах метода и показал, насколько сильно искажается конфигурация фронта пламени и его развитие на плоскостных фотографиях. Имеющиеся стереопары допускают следующие способы расшифровки.

1. Просмотр и пространственное восприятие фотографируемой картины (статическое и динамическое).

2. Нахождение координат точки фотографируемого объекта графическим построением ее по двум кадрам стереопары.

На рис. 1 (см. вклейку, стр. 208) представлены стереокадры процесса сгорания, на которых можно видеть преимущества стереоскопического метода исследования перед обычным (плоскостным).

В этом случае при рассмотрении лишь нижних кадров стереопар, т. е. того, что получается при плоскостном фотографировании, определение момента появления очага воспламенения во времени будет неправильным, так как на нижнем кадре первой стереопары этого очага нет, в то время как на верхнем кадре этой же стереопары он виден. И, наоборот, если рассматривать отдельно верхние кадры стереопар, нельзя обнаружить зарождения и развития второго самостоятельного очага воспламенения, образовавшегося в верхней правой части камеры сгорания (стереопара 8); этого очага нет на верхнем кадре, но он отчетливо виден на нижнем кадре стереопары.

На рис. 2 (см. вклейку, стр. 209) показан пример нахождения места возникновения очага воспламенения в объеме камеры сгорания. Здесь представлена стереофотография, изображающая начальный момент сгорания (очаг воспламенения), по которой графическим построением можно определить место возникновения этого очага в объеме камеры. Здесь плоскость А — плоскость пленки, на которой отложены размеры кадров стереопары (а). Плоскость В — плоскость объектива, впереди которого установлена призматическая стереоприставка (г) с базисом съемки (с).

Проектируя изображение очага пламени (к) с 2 кадров стереопары, находим его положение в камере сгорания (м). Зная расстояние (е) и объем, занимаемый очагом, можно представить пространственную картину очага в объеме бомбы. Плоскостная фотография такими возможностями не обладает. Она дает также ошибочное представление и о величине выгоревшего объема заряда. Если по плоскостной фотографии (один кадр стереопары, рис. 3, а; см. вклейку, стр. 209) можно принять долю выгоревшего объема заряда, равную $\approx 50\%$, то по стереофотографии (этот же

момент времени) можно видеть, что пламенем охвачено не более 30% объема. Кроме того, это не сплошной фронт пламени с расположенными перед ним очагами воспламенения (как это представляется на плоскостной фотографии), а два языка пламени, находящиеся в разных плоскостях по глубине камеры сгорания. Очаги воспламенения в действительности также располагаются в разных плоскостях объема камеры (рис. 3, б). Этот пример показывает, какие новые сведения дает объемная регистрация пламени, с одной стороны, и с другой — объясняет расхождения между кривой изменения давления по времени и охватом пламени топливо-воздушного заряда.

Особый интерес представляет стереофотография, представленная на рис. 4 (см. вклейку, стр. 209). Здесь показан один из моментов процесса сгорания в конечной его фазе — фазе догорания. В этом случае со всей силой проявляются преимущества стереоскопического метода исследования перед плоскостным. Следует отметить, что эта стадия процесса сгорания обычно плохо поддается изучению с помощью киносъемки, так как выделившаяся на оптически-прозрачном стекле сажа (копоть) скрывает от глаз наблюдателя расположение очагов пламени в объеме камеры сгорания. Стадия догорания может быть объективно исследована лишь с помощью стереосъемки. В этом случае осевшая на стекле в результате неполного сгорания топлива сажа помогает изучению природы догорания, так как является отправной базой для получения хорошего стереоэффекта. Следует также отметить, что на плоскостных фотографиях подчас нельзя обнаружить выделившуюся на стекле бомбы сажу и часто эти места принимают за ту часть топливо-воздушного заряда, которая еще не охвачена пламенем. Как показали опыты, применение стереофотографирования устраняет эти ошибки.

Л. Г. ГВОЗДЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ И ПРЕЛОМЛЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ С ПОМОЩЬЮ КАМЕРЫ СФР-2

Детонация представляет собой взрыв, распространяющийся с постоянной для данного взрывчатого вещества скоростью. В данном взрывчатом веществе скорость детонационных волн больше скорости звука. Поэтому при исследовании явлений, связанных с детонационными волнами, необходимо применение высокоскоростной киносъемки.

Схема установки для изучения свойств детонационных волн приведена на рис. 1. Волна получается в стальной секционной трубе, внутреннее сечение которой — квадрат со стороной 3 см. Длина трубы может изменяться до 400 см. Труба откачивается, затем наполняется исследуемой взрывчатой смесью, приготовленной в газометре. Смесь поджигается искрой от высоковольтного трансформатора поджига камеры СФР-2.

Горение на 50—70 см от конца трубы переходит в детонацию. Детонационная волна входит в экспериментальную секцию, которая смонтирована таким образом, что в ней может быть расположена или жесткая перегородка под произвольным углом наклона к оси трубы для исследования отражения, или тонкая пленка для исследования преломления. В этом случае пленка делит трубу на две части, которые заполняются различными газами. В стенки оптической секции заподлицо вставлены оптические стекла. С помощью прибора ИАБ-451 получается теневая картина процесса, которая фотографируется высокоскоростной камерой СФР-2.

Для подсветки в приборе ИАБ-451 использовались импульсные лампы ИПС-500, ИПС-4000. Для синхронизации момента вспышки лампы с моментом появления детонационной волны в экспериментальной секции одновременно с импульсом высокого напряжения, поджигающего смесь, с первичной обмотки трансформатора поджига снимался импульс в 300 в.

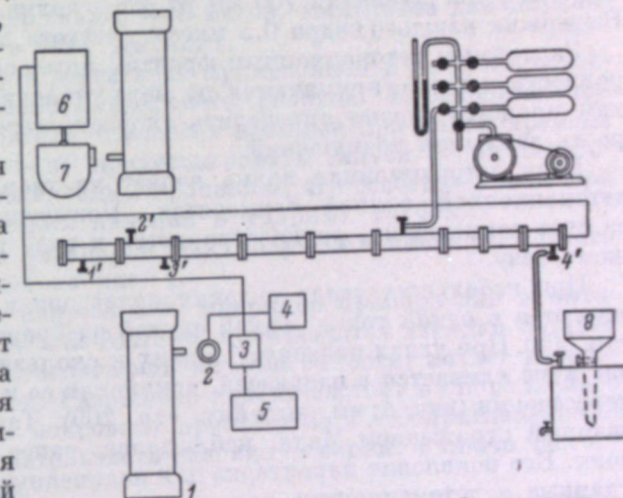


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — прибор ИАБ-451; 2 — импульсная лампа ИПС-500; 3 — схема синхронизации; 4 — блок питания импульсной лампы; 5 — блок питания схемы синхронизации; 6 — пульт управления СФР; 7 — камера СФР; 8 — газометр.

Импульс задерживался электронной схемой задержки на требуемое время, затем поступал на тиратронный ключ, управляющий разрядом в импульсной лампе. Время задержки могло меняться от 100 до 10 000 мксек.

Камера СФР-2 применялась в варианте «лупы времени» с двухрядной вставкой. Для связи приборов ИАБ-451 и СФР-2 применялась переходная оптическая система из двух линз И-13 ($F=300$ мм) и РО-2 ($F=75$ мм). С помощью этой системы исследуемая область изображалась на пленке с уменьшением в 8 раз. Вместе с тем плоскость ножа прибора ИАБ-451 проецировалась на плоскость входных зрачков камеры СФР-2 с уменьшением в 4 раза. Для получения теневой картины использовался двойной нож с расстоянием между гранями 3.6 мм. Следовательно, при применяемой переходной системе ширина входного зрачка СФР-2 уменьшалась до 0.9 мм. Поэтому щели на линзовой двухрядной вставке были сужены до 1 мм. Тем самым при сохранении размеров кадра диаметром 10 мм выдержка каждого кадра была уменьшена в четыре раза.

При помощи изложенной методики исследовалась структура детонационных волн при различных составах смеси и при различных давлениях. Изучалось отражение детонационных волн от твердых преград и преломление при переходе из одной газовой среды в другую.

Приведем некоторые снимки, иллюстрирующие возможности данного метода. На рис. 2 (см. вклейку, стр. 209) снята детонационная волна в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ при давлении 760 мм рт. ст.; волна движется слева направо. Выдержка каждого кадра 0.5 мксек., частота съемки 250 000 кадров/сек.

За прямым детонационным фронтом поток сильно возмущен. Неоднородности потока укрупняются по мере удаления от фронта. По разверткам процесса можно определить скорость детонационной волны и скорость движения возмущений.

Если детонационная волна падает на твердую стенку, то поток за детонационной волной тормозится. Повышение давления, возникшее за счет торможения, распространяется в виде ударной волны по сгоревшему газу.

При небольших углах падения падающая и отраженная волны пересекаются в одной точке. Такой случай изображен на рис. 3 (см. вклейку, стр. 209). При углах падения, близких к скользящему, отраженная волна частично сливается с падающей, искривляя ее и образуя тройную точку пересечения (рис. 4; см. вклейку, стр. 209). Такой тип отражения, названный отражением Маха, наблюдался ранее при отражении ударных волн. Его появление характерно для нелинейных волн, какими являются ударные и детонационные волны.

При падении детонационной волны на границу раздела не с твердой стенкой, а с другой смесью, но также способной к детонации, во вторую среду пройдет волна сжатия. Но так как параметры преломленной волны изменяются, то на границе раздела возникает область повышенного или пониженного давления, вследствие чего обратно в сгоревшую смесь пойдет отраженная волна или сжатия, или разрежения. На рис. 5 (см. вклейку, стр. 209) изображен случай перехода детонационной волны из смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ в $\text{CH}_4 + 3.5\text{O}_2$. Угол падения равен 58° . Наклонная черта в середине кадра — след рамок, между которыми натянута тонкая пленка. Видны падающая, преломленная и отраженная волны, несмотря на резкое возмущение потока за падающей волной. Изменение угла наклона преломленной волны объясняется тем, что химическая энергия за преломленной волной выделяется не мгновенно.

Все эти снимки, кроме качественных заключений о форме и структуре волн, дают возможность вместе с развертками сделать и количественные оценки скоростей волн и углов, образованных ими с поверхностью раздела. Таким образом, предложенная методика дает возможность разобраться в сложных случаях взаимодействия детонационных волн.

Т. В. БАЖЕНОВА, С. Г. ЗАЙЦЕВ, И. М. НАБОКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВ В УДАРНОЙ ТРУБЕ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ИСКРОВОЙ СЪЕМКИ

Для изучения процессов в ударных трубах возможно использование метода свилей с покадровой съемкой процесса. Частота съемки порядка 50 000 кадров/сек. при выдержках $3 \div 5$ мксек. достаточна для выяснения особенностей явлений в этих условиях.

Кадрирование может быть достигнуто применением в качестве источника света высококачественного искрового разряда. Необходимо при этом иметь достаточную яркость отдельных вспышек при малом времени экспонирования. Схема должна предусматривать запуск серии осветительных вспышек самим исследуемым процессом, что особенно важно при исследовании газодинамических явлений в ударных трубах.

Принципиальная схема установки для получения высокочастотного искрового разряда показана на рис. 1.

От источника высокого напряжения, например прибора для испытания пробоя кабелей АКИ-50 или АКИ-70, производится зарядка батареи конденсаторов C_1 . Энергия, запасаемая на этой емкости, питает разрядный контур в момент пробоя. Разрядный контур состоит из параллельно включенных емкости C_2 и искрового промежутка F . Сопротивление R определяет общую продолжительность разряда — серии, а также частоту следования кадров в серии.

Время стояния кадра — продолжительность отдельной вспышки — в серии определяется емкостью, сопротивлением и индуктивностью разрядного контура. Уменьшение индуктивности и удачный выбор сопротивления дают возможность создать вспышки продолжительностью до 10^{-6} сек.

Для получения коротких вспышек заданной интенсивности нужно пользоваться высоким напряжением при меньшей емкости. Схема, использованная нами, имела следующие параметры: батарея конденсаторов общей емкостью 1 мкф заряжалась до напряжения 22 кв от АКИ-2-50. Напряжение на разрядный контур подавалось через сопротивление 7 ком; емкость $C_2=0.02$ мкф. Иницирующий съемку сигнал подавался на триатрон T через емкость C_3 и блок синхронизации B .

Высокочастотный искровой разряд осуществлялся через один искровой промежуток разрядной лампы F . Конструкция лампы подробно описана ранее. Это «линейный» источник света с регулируемым искровым промежутком. Лампа откачивалась и наполнялась водородом до давления 1 атм.

Регистрация процесса осуществлялась на пленку, помещенную на вращающийся барабан, длина пленки 60 см, линейная скорость «непре-

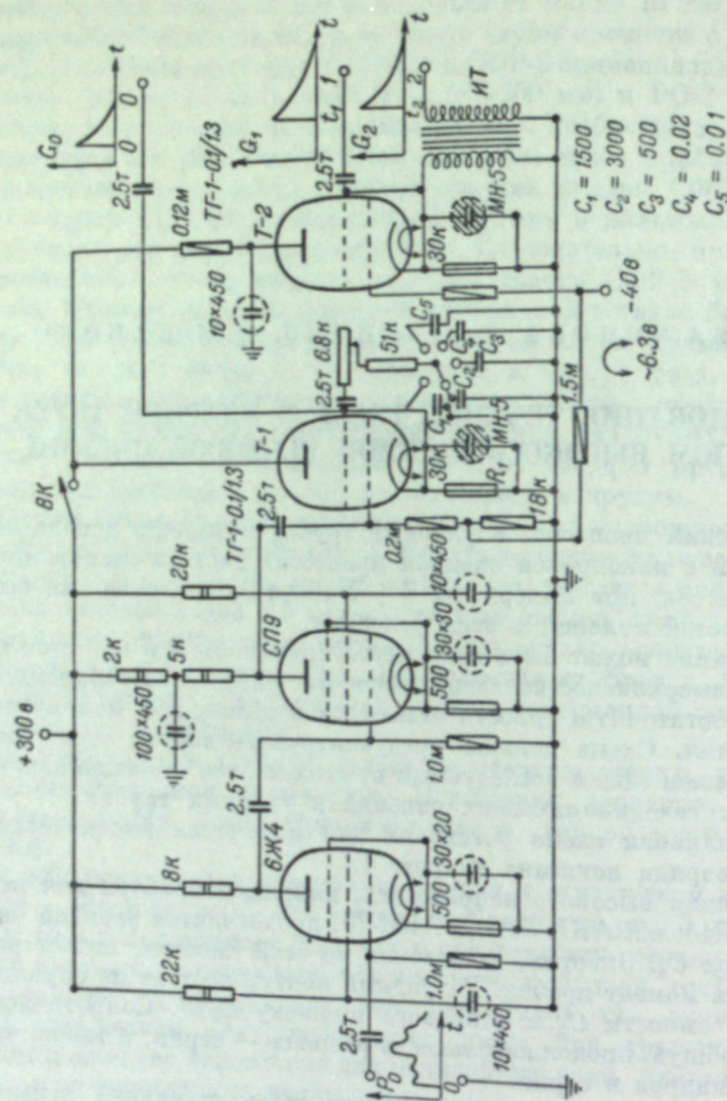


Рис. 2. Схема блока синхронизации.

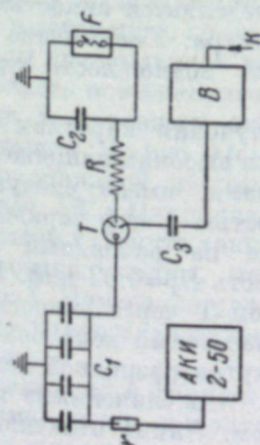


Рис. 1. Принципиальная схема установки для получения высокочастотного искрового разряда.

рывной развертки» 120 м/сек. При размере кадра на пленке 2×13 мм частота съемки могла быть порядка 60 000 кадров/сек.

Уменьшение изображения объекта — смотрового окна камеры ударной трубы — давало возможность увеличивать частоту съемки до 100 000 кадров/сек. Интенсивность отдельных вспышек была достаточной для съемки газодинамических процессов в ударных трубах методом свилей прибором ИАБ-451.

Основным преимуществом использования искровой съемки при изучении процессов в ударных трубах является возможность синхронизировать момент съемки с любой стадией изучаемого явления. Это удается осуществить, инициируя разряд электрическим импульсом, который подается самим регистрируемым процессом.

Специфика работы ударной трубы состоит в неопределенности времени, которое необходимо на разрушение диафрагмы, разделяющей в начальный момент времени камеры низкого и высокого давления. Часто время, прошедшее от момента разрушения диафрагмы до начала интересующей исследователя стадии явления, оказывается меньшим, чем разброс времени разрыва диафрагмы. В связи с этим обстоятельством использование для съемки процессов в ударных трубах съемочных камер, предусматривающих синхронизацию явления со съемкой путем инициирования явления электрическим импульсом, поступающим от камеры, затруднительно. Процесс разрыва диафрагмы, протекающий в неопределенное и практически не контролируемое время, оказывается составной частью общего времени развития изучаемого явления. В этих условиях фиксация нужной стадии процесса на пленке становится фактом случайным.

Удобно поэтому иметь возможность осуществлять запуск съемки от распространяющейся ударной волны, ибо в этом случае неопределенность времени начальной стадии явления исключена.

Источником инициирующего съемку импульса может служить сигнал от датчика давления, ионизационного датчика или от фотоэлемента, если режим распространения волны таков, что вызывает свечение газа во фронте.

В наших опытах пусковой сигнал поступал от датчика давления, изготовленного из керамики титаната бария. Этот сигнал может быть подан на запуск серии осветительных вспышек с некоторой контролируемой задержкой. Запаздывание вспышки относительно момента подачи пускового сигнала определяется параметрами схемы блока синхронизации (рис. 2).

Электрический сигнал положительной полярности от датчика давления подается на вход двухкаскадного усилителя, собранного на лампах 6Ж4 и 6П9. После усиления он поступает на сетку запятого тиратрона и открывает его. При этом начинает заряжаться до положительного потенциала одна из серии емкостей, включенных между землей и сеткой тиратронного реле. После того как напряжение на сетке реле достигнет напряжения зажигания, тиратрон открывается, через него и сеткой обмотку трансформатора происходит разряд анодной емкости реле. Возникающий при этом импульс высокого напряжения в повышающей обмотке трансформатора подается на поджигающий электрод тригatronа. Для выбора необходимой искровой установки через емкость C_3 (клемма 2). Для выбора необходимого времени запаздывания в схеме предусмотрена регулировка постоянного времени RC цепи зарядки емкости в сетке тиратрона реле. Может изменяться как величина сопротивления R , так и величина емкости C .

Время задержки с помощью такой схемы нам удавалось варьировать в диапазоне $150 \div 600$ мксек. (имеется в виду суммарная задержка между моментом прохождения волны мимо датчика давления и появлением первого кадра на пленке).

Интенсивная ударная волна, распространяющаяся в газе, создает за собой газовый поток. Скорость потока и температура газа за волной зависят от параметров ударной волны. Фотографии, полученные нами с помощью высокочастотного искрового разряда, дают возможность изучать характер течения газа в пробке за волной, наблюдать влияние изменения геометрии канала на распространение ударной волны и исследовать явления, происходящие в газе, способном к реакции.

Распространение ударной волны в трубе, структуре потока, возникающего за волной, и форма контактной поверхности видны на фотографии (рис. 3, а; см. вклейку, стр. 224).

Газовая пробка за ударной волной может имитировать в течение некоторого непродолжительного времени поток газа с высокой температурой. Это обстоятельство может быть использовано для исследования газодинамической картины обтекания препятствий сверхзвуковыми потоками газа. На рис. 3, б дана картина обтекания клина потоком газа за ударной волной. Расчетное и экспериментально полученное значение угла раствора присоединенного скачка уплотнения оказались в хорошем согласии.

Большое экспериментальное исследование было проведено нами в ударных трубах по изучению течения реагирующего газа и развитию реакции при изменении параметров реакционно способного газа.

Высокоскоростные фотографии (рис. 4, а, б, в; см. вклейку, стр. 224) показывают возникновение и развитие реакции в газе $4H_2 + O_2$ при отражении ударной волны от торца трубы. Фотографии даны для разных начальных давлений, и, следовательно, газ при отражении имеет разные параметры. Видно, как возникшие очаги воспламенения сливаются или распространяются, захватывая все больший объем, и переходят в детонацию иногда еще в поле кадра.

В зависимости от начального давления и параметров в зоне за отраженной волной время задержки воспламенения и период индукции оказывается разным; по фотографиям это время задержки может быть оценено количественно.

На фотографиях рис. 5, а, б, в (см. вклейку, стр. 224) видна структура фронта детонационной волны и потока газа за ней для случаев возникновения детонации в ударной трубе в смеси $4H_2 + O_2$ за падающей ударной волной для давлений 0.25, 0.15 и 0.08 атм. соответственно.

Приведенные фотографии иллюстрируют возможности, предоставляемые высокоскоростной искровой съемкой, синхронизированной с процессом по схеме ожидания, при исследовании газодинамических явлений в ударных трубах.

Г. И. СТРЕЛКОВ, О. И. ЯСЬКО

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ СТРУИ МЕТОДОМ ФОТОРАЗВЕРТКИ

Высокотемпературная газовая струя находит применение для различных исследований свойств вещества при высоких температурах (до $20\,000^\circ K$), газодинамических исследований в сверхзвуковом потоке газа, а также для исследования теплофизических свойств материалов.

Сущность метода фоторазвертки состоит в том, что изображение струи разворачивается посредством вращающегося зеркала или каким-либо иным методом в направлении, перпендикулярном движению потока. При этом отдельные более яркие места струи, обусловленные некоторыми неоднородностями струи, прочерчивают наклонные линии — «языки» (см. вклейку, стр. 224). Зная скорость развертки изображения на пленке $v_{раз}$ и масштаб изображения m , по углу наклона касательной к «языку» α определяют скорость струи

$$v_{стр} = m \cdot v_{раз} \operatorname{tg} \alpha.$$

При этом можно по каждому «языку» определить скорость в различных сечениях струи. Таким образом, однородная съемка позволяет определить скорость по всей длине струи.

Для развертки изображения светящейся газовой струи авторы применяли известную скоростную камеру ZL-1. Однако для подобного рода исследований эта камера неудобна по следующим причинам.

1. Непрерывная развертка достигается только за счет перемещения пленки, максимальная скорость которой составляет 38 м/сек. Такая скорость является недостаточной для измерения высоких скоростей струи.

2. Мало время исследования, так как кассета вмещает 50 метров пленки, а работа проводится на скорости 38 м/сек.

3. Большой расход пленки.

Более удобны камеры с неподвижной пленкой и скоростью развертки в несколько тысяч метров в секунду. Однако время исследования у них еще меньше. Этот недостаток можно устранить сочетанием зеркальной развертки с киносъемочной камерой. Такая схема обеспечивает получение серии разверток в виде последовательных кадров. При этом в ущерб непрерывности процесса исследования достигается экономный расход пленки при больших скоростях развертки и продолжительном времени исследования. Можно также камере СФР-2 придать периодически срабатывающий затвор, синхронизированный с разверткой, и лентопротяжный механизм с кассетами. Такой аппарат оказался бы удобной универсальной камерой для исследования в высокотемпературных газовых потоках.

В. И. БАБИЙ, И. П. ИВАНОВА

ПРИМЕНЕНИЕ СКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ И ГОРЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Для изучения движения мелких частиц, имеющих температуру значительно более высокую, чем газовая среда, в которой они движутся, а также для исследования движения мелких горящих частиц была применена стробоскопическая фотосъемка и скоростная киносъемка. Исследова-

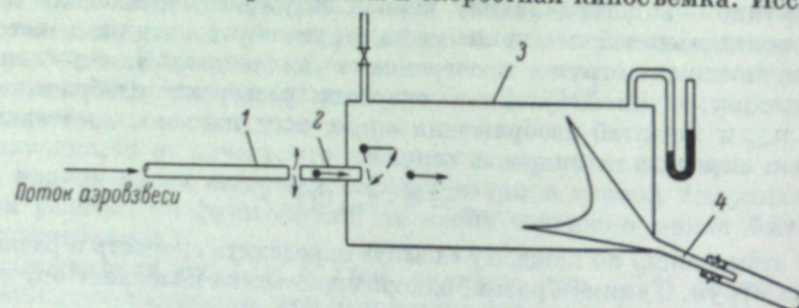


Рис. 1. Схема установки.

ние проводилось по методике, сущность которой может быть понятна из рис. 1.

Разогретая до заданной температуры пылегазовая смесь подавалась по трубке 1. Камера 3 сообщалась с внешней средой лишь трубкой 2, которая располагалась соосно с трубкой 1 и была одного с ней диаметра. Между трубками 1 и 2 устанавливался некоторый разрыв.

Вследствие того что камера 3 была герметичной, газ, проходящий по трубке 1, не мог в нее проникнуть и уходил в зазор между трубками, частицы же, движущиеся с газовым потоком по трубке 1, проскакивали по инерции через трубку 2 в камеру.

Наблюдение за движением частиц в неподвижной газовой среде камеры проводилось через застекленную стенку.

В опытах применялись частицы размером 0.2—1.0 мм, начальная скорость их движения на входе в камеру соответствовала 10—40 м/сек. Химический состав газа в камере и его температуру можно было изменять по желанию экспериментатора.

Для поддержания постоянства состава газа в камере и предотвращения возможных забросов газового потока из трубки 1 в камеру подавалось небольшое количество газа, который выходил через трубку 2 навстречу движущимся частичкам. Частицы, пролетающие через камеру, улавливались ловушкой 4.

Фотографии движущихся частиц при стробоскопической фотосъемке имели вид, представленный на рис. 2 (см. вклейку, стр. 224).

По таким фотографиям достаточно точно может быть определено значение скорости движения частицы на различных участках ее траектории, если известна скорость вращения стробоскопического диска.

Наряду с применением стробоскопической фотосъемки, позволившей установить количественные закономерности в движении горящих частиц, в работе была проведена серия опытов с использованием скоростной киносъемки. Основной задачей таких опытов было изучение поведения частиц в полете и качественное выяснение структуры газового потока вблизи движущейся горячей частицы.

В опытах была использована скоростная кинокамера СКС-1. Съемки производились с частотой 1500—3000 кадров/сек. на пленку типа ДН или ДК, чувствительностью порядка 350 ед. ГОСТа.

Для увеличения изображения частиц на пленке применялись насадки к объективу кинокамеры, масштаб съемки при этом составлял в разных опытах от 1:2 до 1:20.

Достаточно четкое изображение горящих частиц на кинопленке при указанных условиях удалось получить лишь в тех случаях, когда движение горящих частиц происходило в кислородной среде, а температура их при этом была порядка 2500° С.

С помощью киносъемки изучалось движение горящих частиц различных марок углей: электродного, антрацита, тощего и азейского.

При просмотре снятого фильма было обнаружено явление, объяснение которому было трудно дать без проведения специального анализа: изображения горящих частиц на кадрах имели четко выраженные «хвосты», расположенные в верхней части частицы.

При вертикальном движении частиц снизу вверх по мере смещения изображения частицы в поле кадра от нижней его границы к верхней «хвосты» претерпевали изменения и проходили через определенные стадии (рис. 3; см. вклейку, стр. 224). При движении частиц сверху вниз «хвосты» изменялись в обратном порядке.

При горизонтальном движении частиц (перпендикулярно движению пленки) «хвосты» смещались так, что верхний всегда оказывался впереди движущейся частицы, а нижний сзади (рис. 4; см. вклейку, стр. 224).

При горизонтальном движении частиц в верхней части кадра изображения их на пленке имели лишь задние, опущенные вниз «хвосты». При движении частиц в нижней части кадра, наоборот, наблюдались лишь вытянутые вверх передние «хвосты», а задние почти отсутствовали.

С изменением масштаба съемки в 10 раз высота «хвостов» изменилась мало.

Изложенное выше позволяет сделать вывод, что появление «хвостов» у изображений мелких горящих в кислороде угольных частиц является, по-видимому, результатом aberrаций типа кома, вызванных установленной в кинокамере СКС-1 компенсационной вращающейся призмой. Отсутствие в ряде случаев «хвостов» у изображений частиц может быть объяснено сравнительно низкой температурой этих частиц, при которой яркость «хвостов» недостаточна для фиксирования их на кинопленке. При высоких же температурах объектов яркость «хвостов» становится настолько большой, что плотность их изображения на пленке становится сравнимой с плотностью изображения самих частиц.

Учитывая, что иногда бывает трудно определить без проведения специальных исследований, является ли наблюдаемое при просмотре кинопленок явление свойством изучаемого объекта или результатом искажений, вызванных оптической системой, мы считали уместным уделить этому вопросу в данной статье особое внимание. Работа проводилась в Лаборатории физики горения Всесоюзного теплотехнического института.

В. М. БОРИШАНСКИЙ, П. А. МАСЛИЧЕНКО,
Б. С. ФОКИН

МЕХАНИЗМ ДВИЖЕНИЯ ФАЗ ПРИ ПЛЕНОЧНОМ КИПЕНИИ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ ЖИДКОСТИ

Пузырьковое кипение характерно весьма интенсивным теплообменом между поверхностью нагрева и кипящей жидкостью. В этом случае поверхность нагрева омывается конвектирующей жидкостью.

При определенной тепловой нагрузке наступает пленочный режим кипения, при котором поверхность нагрева отделена от жидкости слоем пара. При этом интенсивность теплообмена резко снижается по сравнению с пузырьковым кипением, и температура поверхности нагрева существенно отличается от температуры насыщения жидкости. Пленочное кипение может возникнуть и продолжительное время существовать на локализованном участке поверхности нагрева. Изучение пленочного кипения прозрачных жидкостей удобно проводить с помощью кинематографических методов исследования. Поэтому в излагаемой ниже работе, посвященной изучению пленочного кипения в органических жидкостях, была применена скоростная киносъемка процесса.

Исследование было проведено на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1. Реактор снабжен иллюминаторами, позволявшими применять различные способы подсветки объекта. Конструкция реактора давала возможность проводить эксперименты как на горизонтальных, так и на вертикальных трубках. Трубки применялись из нержавеющей стали IX18H9T с внешними диаметрами 2,5—3,5 мм и длинами рабочих участков 25 ÷ 70 мм. Трубки нагревались переменным током низкого напряжения. Вертикальные трубки снабжались пароотводящим конусом, укрепленным у нижнего токоподвода (рис. 2). Было замечено, что когда на всей трубке устанавливалось пленочное кипение, на нижнем ее конце имелся еще пузырьковый режим кипения. Поэтому конус отводил пар, образующийся на нижнем конце трубки, за пределы кадра. Этим устранялись подпитка этим паром пленки на верхних частях трубки и влияние этого парообразования на кинематику и динамику движения паровой фазы на рабочем участке трубы, а следовательно, на устойчивость существования пленочного кипения.

Киносъемка производилась киносъемочной камерой типа СКС-1 с объективом «Юпитер-11» на 16-мм киноплёнку светочувствительностью 250 ед. ГОСТа. Аппарат СКС-1 был снабжен отметчиком времени и обеспечивал частоту съемки до 5000 кадров/сек. Снимаемый участок трубки освещался сзади и спереди четырьмя прожекторами с лампами мощностью 400 вт каждая.

На рис. 3, 4 (см. вклейку, стр. 225) представлены фотографии эволюции во времени формы пленки пара при пленочном кипении на вертикальной и горизонтальной трубках.

Просмотр кадров снятых кинофильмов выявил совершенно различный характер формирования поверхности раздела паровой и жидкой фаз при пленочном кипении жидкостей на горизонтальных и вертикальных поверхностях.

На горизонтальной трубке паровая пленка гладкая и тонкая. Течение пара в ней по периметру трубки вверх, по-видимому, ламинарное. Около

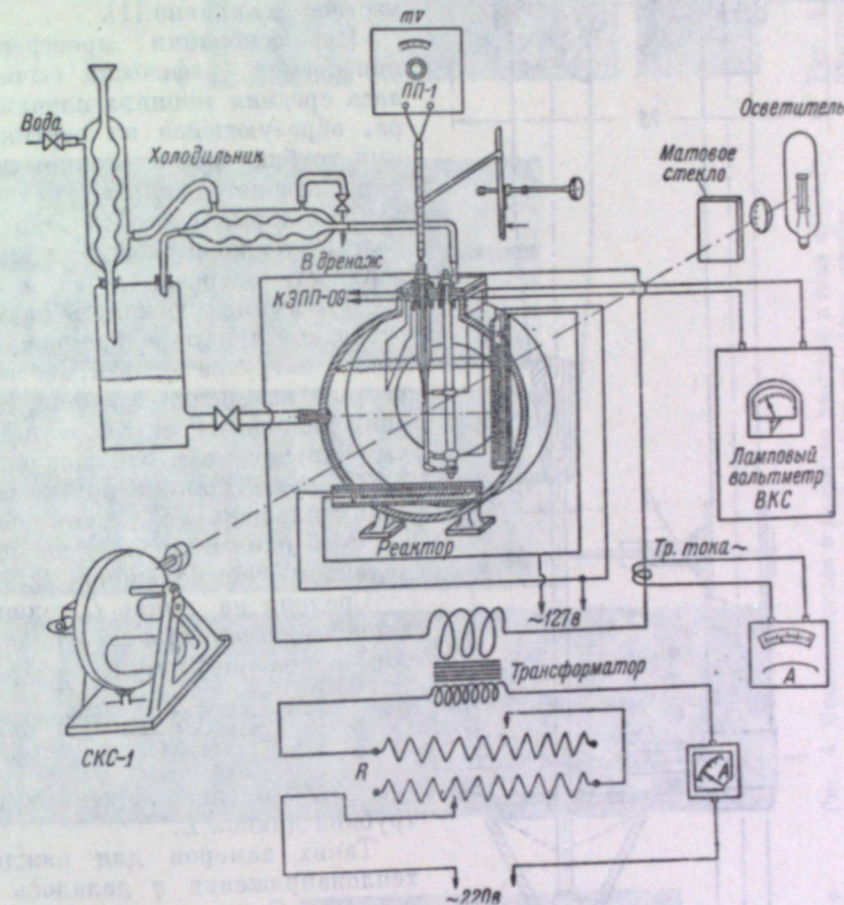


Рис. 1. Схема установки.

верхней образующей трубки замечалось периодическое накопление и последующее отделение пара, который поднимался в объеме жидкости в виде больших плоских пузырей. При этом наблюдалось периодическое возмущение поверхности раздела фаз с возникновением слабого волнового движения вдоль образующей трубки. Соприкосновения жидкости с поверхностью трубки не наблюдалось. Наоборот, поверхность вертикальной трубки отделялась от жидкости пленкой пара значительно большей толщины, чем при кипении на горизонтальной трубке. Не наблюдалось также преимущественного роста толщины паровой пленки по высоте трубки. Это согласуется с тем, что опытные значения коэффициента теплоотдачи также не зависят от вертикального размера поверхности нагрева. В любой момент времени пленка пара могла быть представлена в виде последовательного по высоте набора грушевидных пузырей, поднимающихся вверх по трубке.

Местами два-три пузыря объединялись в один большой, создавая локальное вспучивание пленки пара. Замечалось, что внутри пузыря движение пара вихревое. Локальная толщина и форма паровой пленки непрерывно менялась в широких пределах. При этом не было обнаружено касания жидкости с раскаленной поверхностью трубки. В опытах с водой замечалось касание жидкости с поверхностью и местное вскипание [1].

На основании проведенных киносъемок графически вычислялась средняя толщина пленки пара, образующейся на вертикальных трубках при пленочном кипении этилового спирта, этилового эфира и нормального гексана при разных теплонапряжениях q поверхности нагрева.

В этих целях кадры фильма, отснятого при определенной тепловой нагрузке q , взятые через равные интервалы времени, проецировались на экран с линейным увеличением изображения в $3 \div 5$ раз. Планиметром замерялась площадь S_i , занимаемая пленкой пара и трубкой на определенном участке длиной L .

Средняя на длине L толщина пленки δ_i вычислялась для каждого кадра по формуле

$$\delta_i = \frac{S_i - S_{тр}}{2L}, \quad (1)$$

где $S_{тр}$ — площадь, занимаемая трубкой длиной L .

Таких замеров для каждого теплонапряжения q делалось до $N=100$. Оказалось, что дисперсия ξ распределения вероятности встречи пленки толщиной δ_i невелика и подчиняется нормальному закону распределения Гаусса. Для пленочного кипения этилового спирта при $q=154000$ ккал./м² час дисперсия была вычислена по двум формулам:

$$\xi = \left(\frac{\sum_{i=1}^N \epsilon_i}{N-1} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

Здесь

$$\epsilon_i = S_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i,$$

где N — число измерений,

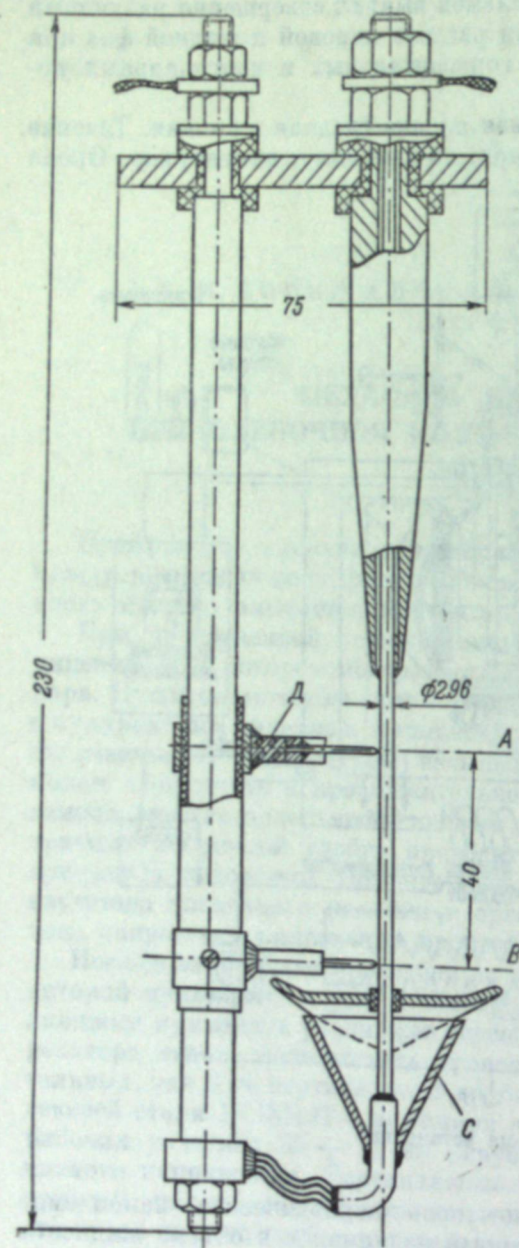


Рис. 2. Схема экспериментального участка. АВ — рабочий участок; С — колпачок; Д — вольтов вывод.

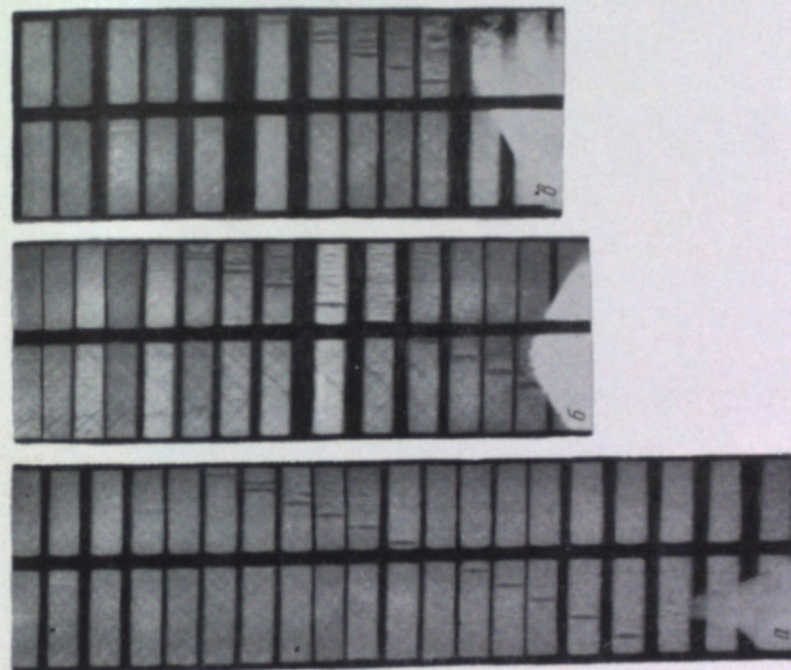


Рис. 4. Возникновение и развитие реакции в газе $4H_2+O_2$ при отражении ударной волны от торца трубы.

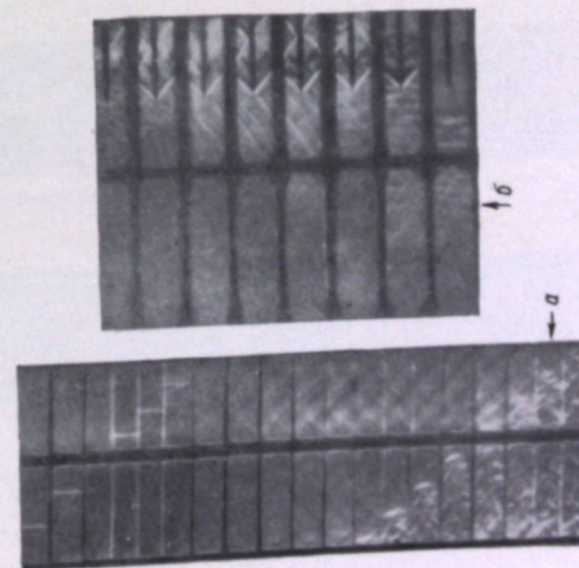


Рис. 3. Распространение ударной волны в трубе (а) и обтекание клина потоком газа за ударной волной (б).

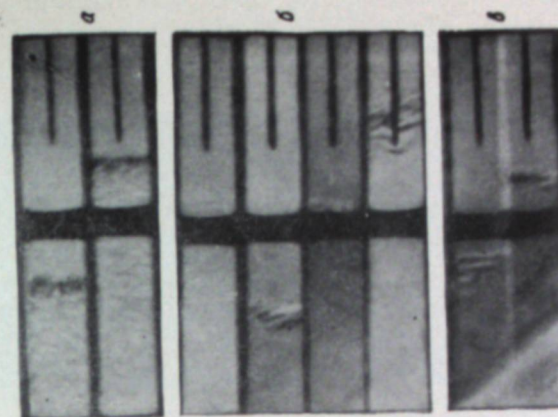
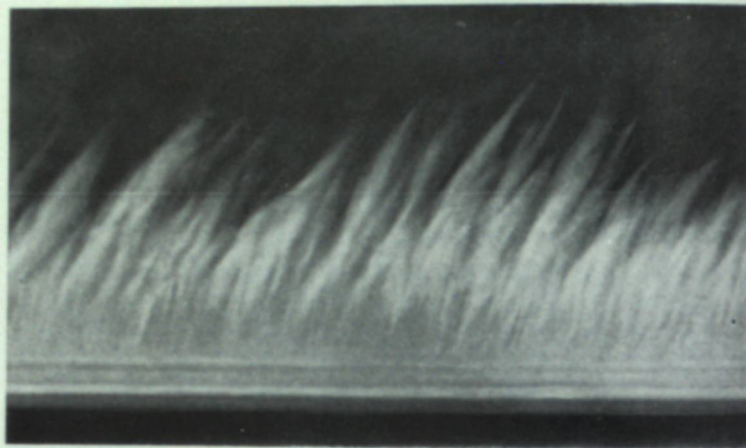


Рис. 5. Структура фронта детонационной волны и потока газа за ней.

К ст. Г. И. Стрелкова и др.,
стр. 219.



Фоторазвертка высокотемпературной газовой струи.

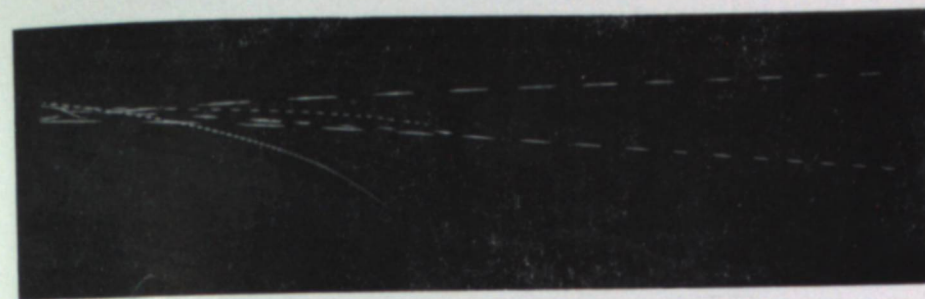


Рис. 2. Фотография следа движущейся частицы с применением стробоскопического диска.

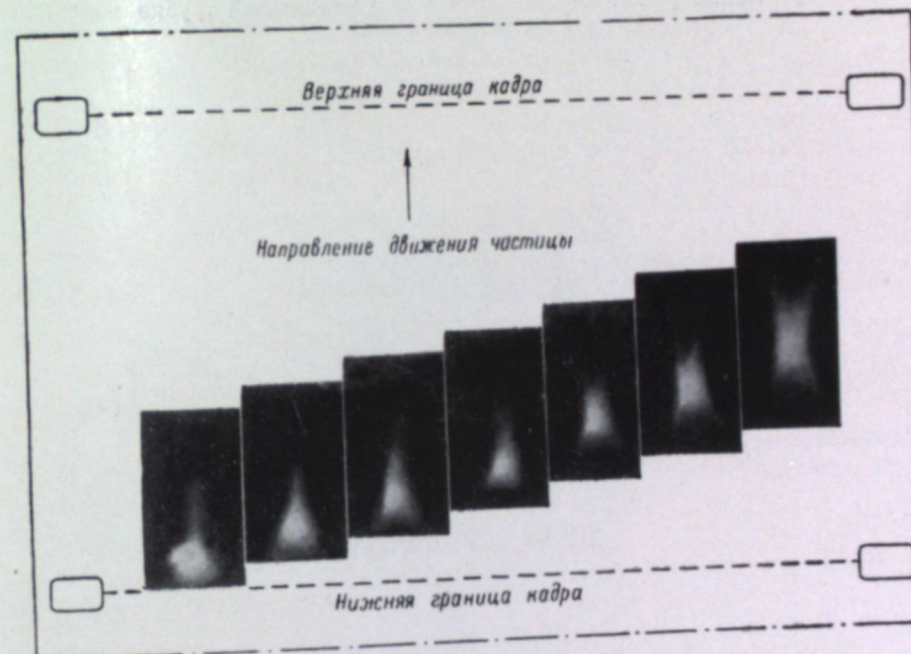


Рис. 3. Последовательные изображения горячей частицы при движении ее в вертикальном направлении (частота съемки 300 кадров/сек.).



$W=35 \text{ м/сек.}$ Направление движения частицы



Направление движения частицы

Рис. 4. Последовательные изображения горячей частицы при замедленном ее движении в горизонтальном направлении (частота съемки 1200 кадров/сек.).

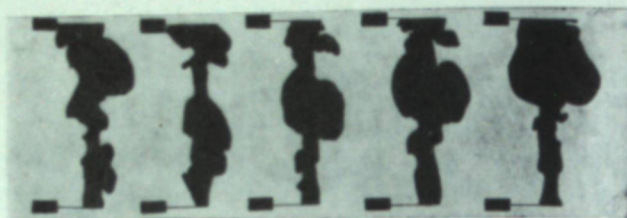


Рис. 3. Пленочное кипение Н-гексана при теплонапряжении $q=231\,000$ ккал./м²час на вертикальной трубке диаметром 3 мм.

Кинокадры выбраны через 0.05 сек.

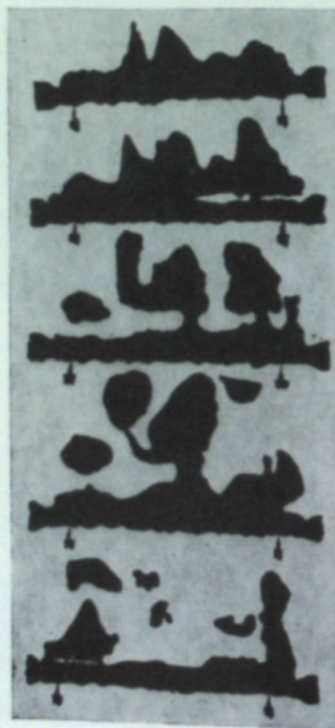


Рис. 4. Пленочное кипение этилового спирта на горизонтальной трубке диаметром 3 мм при теплонапряжении $q=177\,000$ ккал./м²час.

Кинокадры выбраны через 0.07 сек.

и

$$\xi = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \eta. \quad (3)$$

Здесь η — простая средняя ошибка

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N |\varepsilon_i|}{\sqrt{N(N-1)}}.$$

Для числа измерения $N=100$ получилось для данного случая по формуле (2) $\xi=0.0305$, по формуле (3) — $\xi=0.032$.

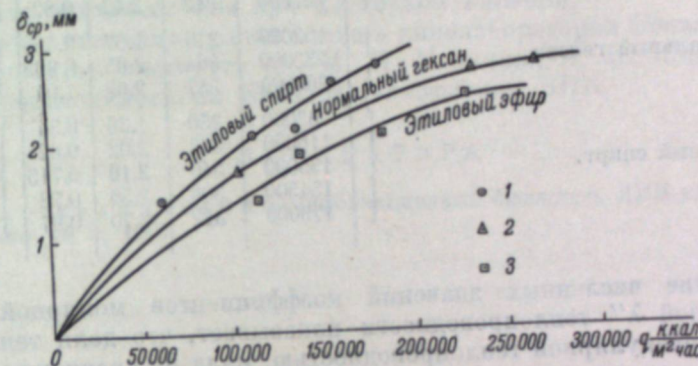


Рис. 5. Экспериментальные данные по замеру усредненных толщин пленок пара, образующихся при пленочном кипении органических жидкостей на вертикальных трубках.
1 — этиловый спирт; 2 — нормальный гексан; 3 — этиловый эфир.

Расхождение в вычислении дисперсии в 5% показало правомочность применения нормального закона распределения при вычислении средней толщины пленки пара δ_{cp} по формуле

$$\delta_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i}{N}.$$

Результаты проведенных вычислений и измерений приведены в таблице и на графике $\delta_{cp}=f(q)$ (рис. 5).

Одновременно с киносъемкой производилось измерение коэффициента теплоотдачи. Из рис. 6 видно, что при увеличении тепловой нагрузки q теплоотдача несколько повышается, несмотря на увеличение толщины пленки пара δ_{cp} (рис. 5). Это повышение теплоотдачи, по-видимому, связано с увеличением интенсивности турбулентного переноса в паровом слое и усилением перемешивания в прилегающих слоях жидкой фазы с ростом теплонапряжения поверхности нагрева.

Степень турбулизации парового слоя можно оценить, вычислив среднюю величину коэффициента молярного переноса тепла λ''_{cp} по формуле

$$\lambda''_{cp} = \delta_{cp} \alpha, \quad (5)$$

где δ_{cp} и α — опытные значения средней толщины пленки и коэффициента теплоотдачи.

В таблице приведены λ''_{cp} , вычисленные по формуле (5) для разных жидкостей и тепловых нагрузок. В последнем столбце этой таблицы приведены табличные значения коэффициента молекулярной теплопроводности λ'' для паров этих жидкостей при температуре насыщения.

Жидкость	q , ккал./м ² ·час	α , ккал./м ² ·час · град.	$\delta_{\text{ср}}$, мм	$\lambda''_{\text{ср}}$, ккал./м · час · град.	λ'' , ккал./м · час · град.
Этиловый эфир.	118000	265	1.47	0.39	0.015
	136000	285	1.82	0.52	
	180000	312	2.05	0.64	
	227500	342	2.40	0.82	
Нормальный гексан.	102000	275	1.67	0.46	0.014
	232000	364	2.65	0.965	
	263000	387	2.69	1.04	
Этиловый спирт.	62000	250	1.36	0.34	0.017
	116000	303	2.02	0.62	
	135000	340	2.10	0.715	
	154500	306	2.56	0.78	
	179000	322	2.70	0.87	

Сравнение численных значений коэффициентов молярной $\lambda''_{\text{ср}}$ и молекулярной λ'' теплопроводности показывает, что доля тепла, передаваемая молекулярной теплопроводностью, мала по сравнению с турбу-

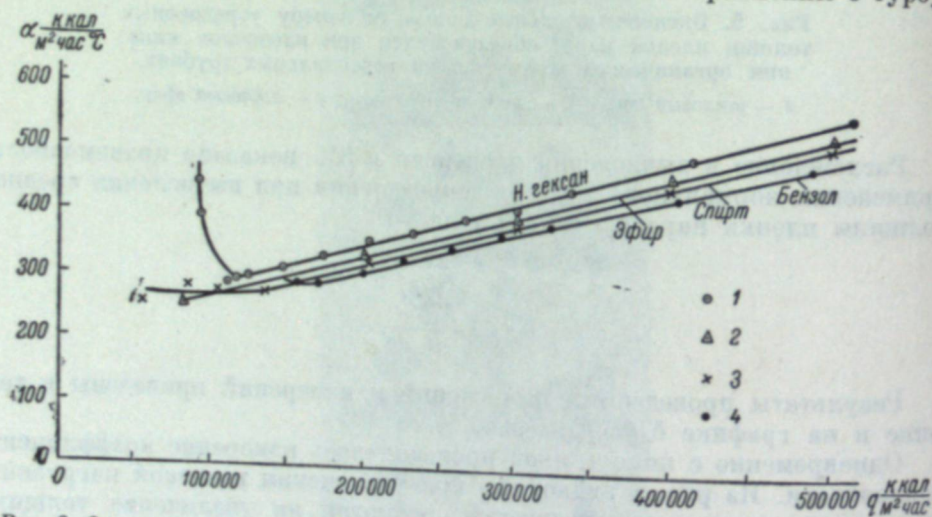


Рис. 6. Опытные данные по теплоотдаче при пленочном кипении органических жидкостей на вертикальных трубках диаметрами 3 мм при атмосферном давлении.

1 — нормальный гексан; 2 — этиловый эфир; 3 — этиловый спирт; 4 — бензол.

лентным переносом тепла в паре от вертикальных поверхностей нагрева при пленочном кипении.

Толщина паровой пленки в предположении ламинарного течения пара в ней может быть вычислена по формуле

$$\delta = \text{const} \sqrt[3]{\frac{q \mu'' \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma - \gamma''}}}{r \gamma'' (\gamma - \gamma'') \left(1 + \frac{c_p'' \Delta t}{2r}\right)}}, \quad (6)$$

где σ , γ , r — коэффициент поверхностного натяжения, удельный вес и скрытая теплота парообразования жидкости; μ'' , c_p'' , γ'' — коэффициент вязкости, теплоемкость и удельный вес пара; Δt — перепад температур между поверхностью нагрева и жидкостью.

Вычисленные по этой формуле толщины паровой пленки в десять и более раз меньше замеренных в опытах с помощью киносъемки, что свидетельствует о турбулентном переносе количества движения и тепла в паровом слое.

Таким образом, использование нового метода исследования процесса пленочного кипения позволило получить данные, значительно уточнившие представления о физике процесса пленочного кипения и, в частности, о механизме движения фаз при пленочном кипении.

Методика киносъемки разработана в кинолаборатории Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина Я. И. Шпильбергом. Съемки производились на Кафедре теплофизики ЛПИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Научно-технический информационный бюллетень ЛПИ им. М. И. Калинина, № 2, 1960.

В. П. ПУХ

ИЗУЧЕНИЕ СКОРОСТИ РОСТА ТРЕЩИН В ПРОЗРАЧНЫХ ТЕЛАХ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФОТОГРАФИРОВАНИЯ

Интерес к кинетике роста трещин продиктован тем, что развитие сквозной трещины является конечным актом разрушения твердых тел и, следовательно, изучение этого вопроса может расширить представления о природе прочности твердых тел.

Скорость прорастания трещин для силикатного стекла составляет 1500 м/сек. [1]. Для изучения столь быстро протекающего процесса требуется частота съемки порядка сотен тысяч кадров в сек. Основной экспериментальной трудностью в изучении скорости разрыва при статическом нагружении является несоизмеримость времени нагружения образца до разрыва (несколько секунд) со временем прорастания разрыва (порядка 10^{-4} — 10^{-5} сек.). Это представляет жесткие требования к синхронизации начала съемки с началом процесса разрушения.

Нами использовалась искровая установка, аналогичная разработанной в 1947 г. Ф. Ф. Витманом, В. А. Степановым, А. И. Салищевым и Л. М. Шестопаповым [2, 3].

Основные параметры нашей установки:

1. Общее число кадров 25
2. Частота съемки 250 000 кадров/сек.
3. Длительность съемки 100 мсек.
4. Диаметр фотографируемого поля 140 мм
5. Масштаб изображения 1 : 11.2
6. Качество снимков позволяет измерять

перемещения объекта с точностью ± 0.2 мм

Для съемки использовалась киноплёнка типа А.

Для синхронизации начала съемки с началом роста трещин использовался сам процесс разрушения. С этой целью на образец вблизи места ожидаемого начала разрушения (в условиях статического нагружения — вблизи вершины предварительно созданной начальной трещины, в условиях динамического нагружения — вокруг точки удара) вакуумным распылением наносилась полоска алюминия (рис. 1), которая включалась в схему импульсного усилителя. При прохождении трещины через металлический слой нарушалась его электропроводность, что и приводило к срабатыванию схемы. На рис. 2 представлена схема импульсного усилителя. В момент разрыва слоя алюминия (МРЦ на схеме) импульс подается на лампу 6ПЗ и после усиления на сетку тиратрона ТГИ-90/8, который зажигает запальный разрядник a_0 схемы осветителя оптической установки. Время срабатывания схемы составляло примерно 5 мсек.

Изучение движения трещины осуществлялось при двух способах нагружения образца. В первом случае, когда преследовалась цель изучения связи между действующим напряжением и скоростью роста трещины, плоские образцы, вырезанные из стекла или канифоли шириной в $20 \div$

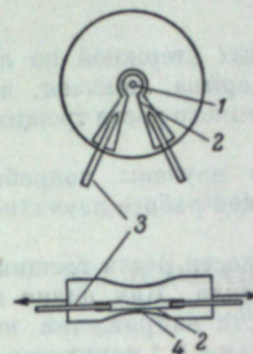


Рис. 1. Образцы с напыленным сигнальным слоем.

- 1 — место удара; 2 — напыленный алюминий;
- 3 — контактные выводы;
- 4 — место начальной трещины.

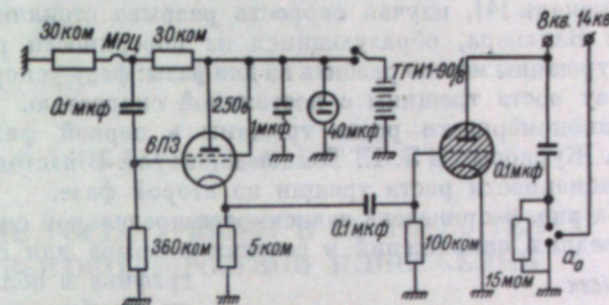


Рис. 2. Схема импульсного усилителя.

$\div 40$ мм и длиной в $150 \div 180$ мм, закреплялись в захватах специального устройства и подвергались нагружению растяжением.

В другом случае, когда изучалось влияние температуры на максимальную скорость роста трещины, тонкие диски диаметром 150 мм, свободно опертые по контуру, подвергались местному нагружению в центре с помощью конического пружинного ударника.

Плоскость образцов при фотографировании располагалась под углом 45° к направлению пучка света, что обеспечивало возможность хорошего

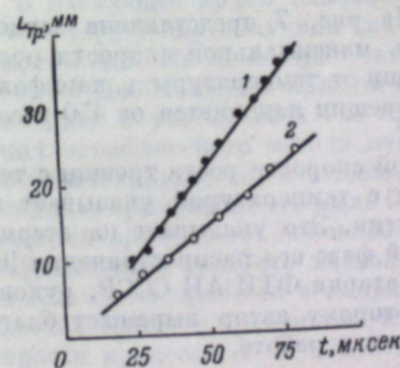


Рис. 5. Зависимость длины трещины от времени.

- 1 — ударное нагружение; 2 — статическое нагружение ($\sigma_{ср} = 0.028$ кг/мм²).

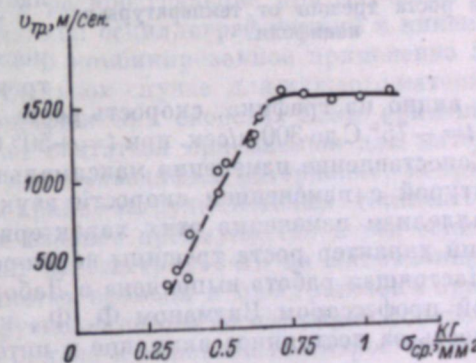


Рис. 6. Зависимость предельной скорости роста трещины от среднего напряжения в силикатном стекле.

разрешения трещины сразу же после того как ширина ее становилась соизмеримой с длиной световой волны. В качестве примера на рис. 3 (см. вклейку, стр. 232) представлена серия фотографий, демонстрирующая развитие трещины в пластине из канифоли, подвергнутой статическому растяжению.

На рис. 4 (см. вклейку, стр. 233) представлено развитие трещин в диске канифоли при ударном нагружении.

Строя на основании приведенных фотографий график «длина трещины—время» (рис. 5), можно было по наклону кривых определять скорость роста отдельных трещин с точностью до 5%.

Результаты измерений

Смекаль [4], изучая скорость разрыва стеклянных стержней по линиям Вальнера, образующимся на поверхности разрыва, показал, что рост трещины можно разбить на две фазы: фазу ускоренного роста трещины и фазу роста трещины с постоянной скоростью.

Закономерности роста трещины в первой фазе изучены подробно С. Н. Журковым и Э. Е. Томашевским [5]. В настоящей работе изучались закономерности роста трещин во второй фазе.

На рис. 6 приведена зависимость предельной скорости роста трещины от средних напряжений в сечении разрыва для стекла. Как видно из графика, в области напряжений выше, приблизительно, 0.1 технической прочности данного материала предельная скорость роста трещины не зависит от средних напряжений.

В области же напряжений, ниже указанных, вопреки существовавшим представлениям [1, 4], скорость зависит от величины средних напряжений. Снижение предельной скорости роста трещин в области малых средних напряжений связано, по нашему мнению, с недостаточной интенсивностью поступления упругой энергии к вершине трещины из прилегающих областей [6].

На рис. 7 представлена зависимость максимальной скорости роста трещин от температуры в канифоли.

Как видно из графика, скорость роста трещин изменяется от 450 м/сек. при $t = -75^\circ \text{C}$ до 300 м/сек. при $t = +50^\circ \text{C}$.

Сопоставление изменения максимальной скорости роста трещин с температурой с изменением скорости звука с температурой указывает на атермический характер роста трещины во второй фазе его распространения [6].

Настоящая работа выполнена в Лаборатории ФТИ АН СССР, руководимой профессором Витманом Ф. Ф., которому автор выражает благодарность за постоянное внимание и интерес к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Schardin und W. Struth. *Glastechn. Berichte* 16, № 7, 219, 1938.
2. А. И. Салищев, УНФ, VI, 155, 1959.
3. Ф. Ф. Витман и В. А. Степанов, Сб. «Некоторые проблемы прочности твердого тела», Изд. АН СССР, 207, 1959.
4. A. G. Smekal. *Acta Physica Austriaca*, 7, № 2, 110, 1953.
5. С. Н. Журков, и Э. Е. Томашевский, ЖТФ, 27, № 6, 1248, 1957.
6. Е. А. Кузьмин и В. П. Пух, Сб. «Некоторые проблемы прочности твердого тела», Изд. АН СССР, 367, 1959.

В. М. ФИНКЕЛЬ, И. А. КУТКИН

ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА ТРЕЩИН В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ

В течение двух последних лет Сибирский металлургический институт совместно с ВНИИГидроуголь проводил исследование процесса разрушения некоторых твердых тел под действием динамических нагрузок (ударов).

Всякое разрушение образца, детали или части машины, происходит ли оно под действием статических или динамических нагрузок, является результатом зарождения и дальнейшего прогрессирования (под действием приложенных нагрузок) зоны нарушения сплошности материала, известной в технике под названием трещины. Следовательно, изучение процесса разрушения необходимо начинать прежде всего с исследования зарождения и роста зоны разрушения в твердых телах, с исследования особенностей кинетики этой зоны, с выяснения тех факторов, которые способствуют процессу разрушения или тормозят его развитие.

В настоящее время наибольшее распространение при изучении процесса разрушения получили два метода: осциллографический и кинематографический. Не исключено также и комбинированное применение этих методов. Необходимо в каждом отдельном случае для каждого материала подходить с учетом всех его специфических свойств. Если применение осциллографического метода может считаться приемлемым для материалов-диэлектриков, то, очевидно, для проводящих материалов, например металлов, применение его было бы крайне затруднительным. Кинематографический метод имеет основное и главное преимущество перед осциллографическим в том, что позволяет зарегистрировать на киноплёнке отдельные фазы процесса в координатах времени и пространства и при достаточно большом временном разрыве свести до минимума усреднение скорости процесса, т. е. подойти близко к мгновенным скоростям.

Рост трещин при динамическом разрушении стекла

В первой серии опытов со стеклом исследовался сравнительно медленный рост трещин в пластинках фотостекла (18×24 см). Выбор в качестве образцов пластинок фотостекла не случаен и объясняется прежде всего его однородностью.

Схема испытания и киносъемки показана на рис. 1. Фотопластинка 5 вдоль длинной стороны лежит на двух горизонтальных опорах 4. На одном краю в середине малой стороны установлен боек 6, свободно перемещающийся в направляющей. Источник света 1 освещает белый рассеивающий экран 3, расположенный под углом 50° к плоскости образца. Киносъемочная камера 2 (СКС-1М) наклонена также под углом 50° к плос-

кости образца. Свободно падающий груз P ударяет по бойку $б$, в результате на краю пластинки под бойком образуется основная трещина, которая распространяется вдоль образца, почти не отклоняясь от прямолинейного направления. Киносъемочная камера включается раньше момента удара груза по бойку, и, таким образом, к моменту начала разрушения образца частота съемки достигает 4500—4700 кадров/сек.

В данном случае трещина представляет собой световой клин, который начинает рассеивать падающий на нее с экрана свет, когда толщина его в вершине достигает размера, равного примерно длине волны видимого света ($5 \times 10^3 \text{ \AA}$). На негативе кинокадра она регистрируется в виде четкой

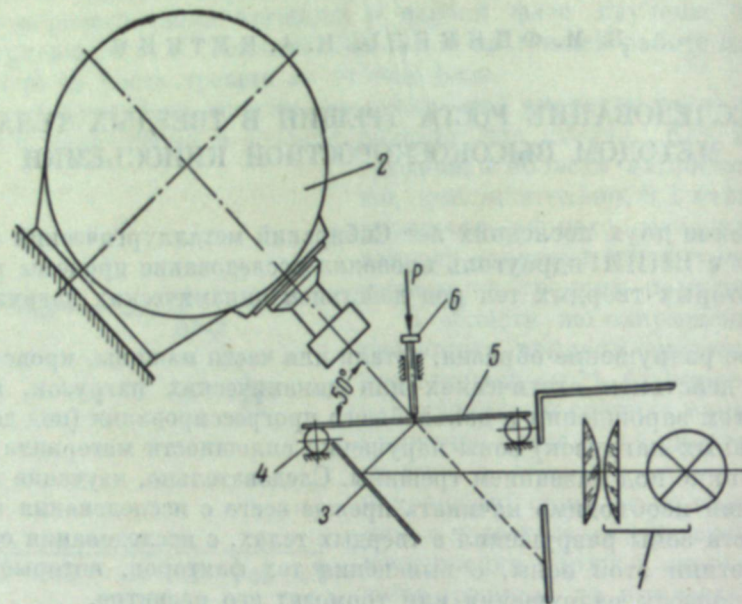


Рис. 1. Схема высокочастотной киносъемки трещин в пластинках фотостекла.

черной полосы. При сравнительно небольших скоростях роста такой трещины (или при большом временном разрешении между смежными кадрами) может быть получено достаточно четкое изображение передовой (фронтальной) ее части.

Для отметки момента удара по образцу использовалась импульсная лампа-вспышка, контакты которой замыкались при соприкосновении груза с бойком $б$. Светящееся тело лампы фокусировалось специальной оптической системой на плоскости образца, а на негативе кинокадра регистрировалась черная отметка (рис. 2; см. вклейку, стр. 232). Введение такой отметки позволяет решить вопрос о временной задержке начала разрушения по отношению к моменту удара.

При данном размере длины образца, используя камеру СКС-1М, можно получить ограниченную скорость распространения трещины. Если, например, частота съемки процесса равна 4500 кадров/сек., т. е. разрешение по времени между двумя смежными кадрами составляет $22 \cdot 10^{-5}$ сек., то при длине образца 240 мм максимально возможная регистрируемая скорость роста трещины составит 1090 м/сек. Ясно, что такая регистрация не дает желаемых результатов, так как трещина будет «проскакивать» на одном кадре.

Во второй части работы со стеклом опыты проводились таким образом, чтобы создать условия для получения больших скоростей разрушения и по возможности приблизиться к максимальным.

К ст. В. П. Пух,
стр. 229.

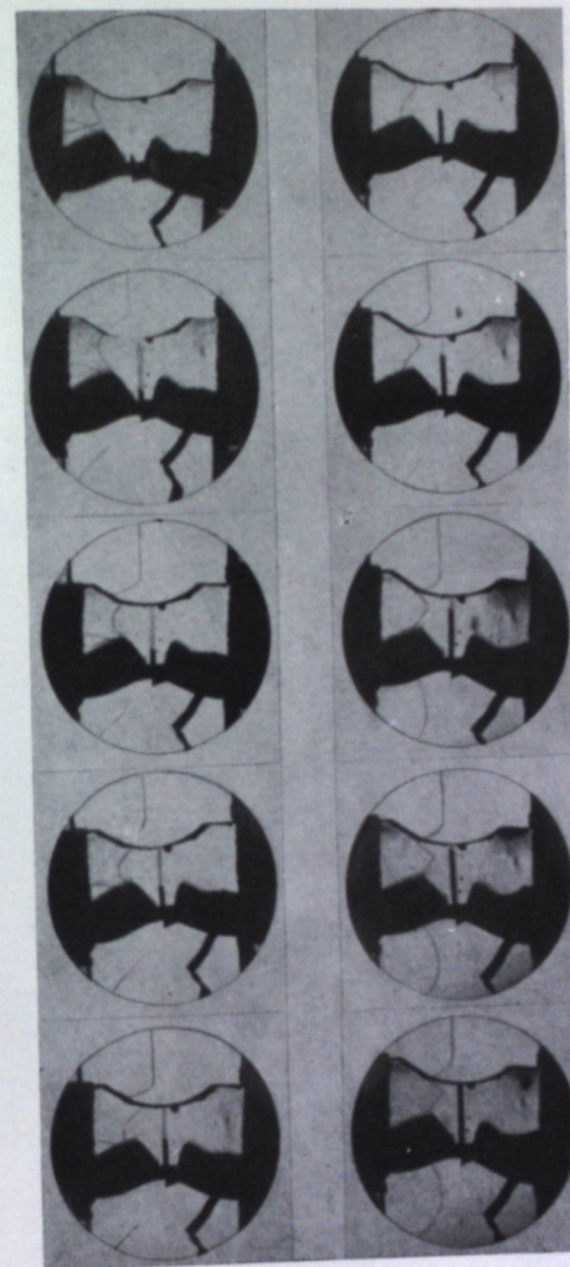


Рис. 3. Развитие трещины в пластине из канифоли, подвергаемой статическому растяжению.

Частота съемки 250 000 кадров/сек., растяжение производится в горизонтальном направлении; нижний и зачерненный край образца представляет собой напыленный проводящим слоем участок; трещина растет вертикально.

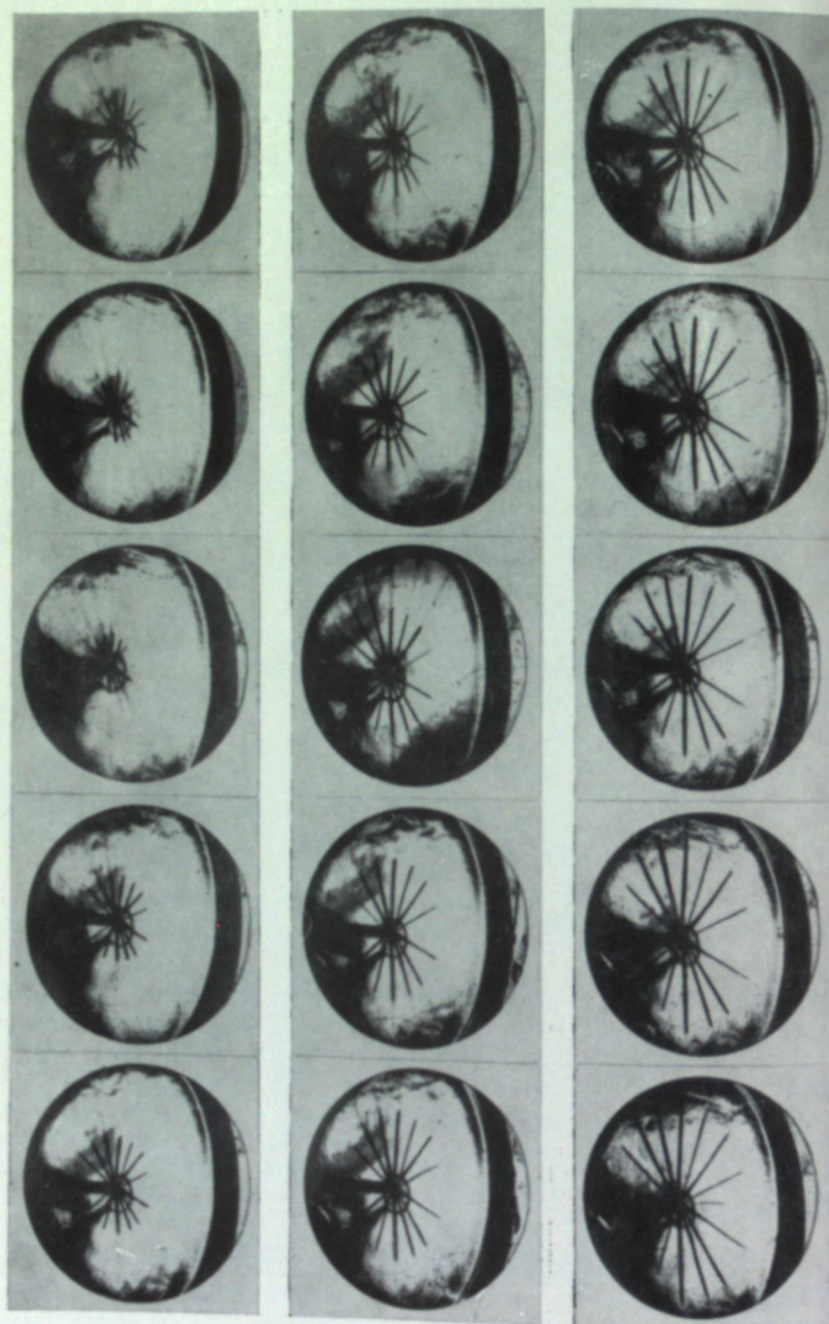


Рис. 4. Развитие трещин в диске канифоли при ударе бойком, скорость удара ~ 1 м/сек.
Частота съемки 250 000 кадров/сек.

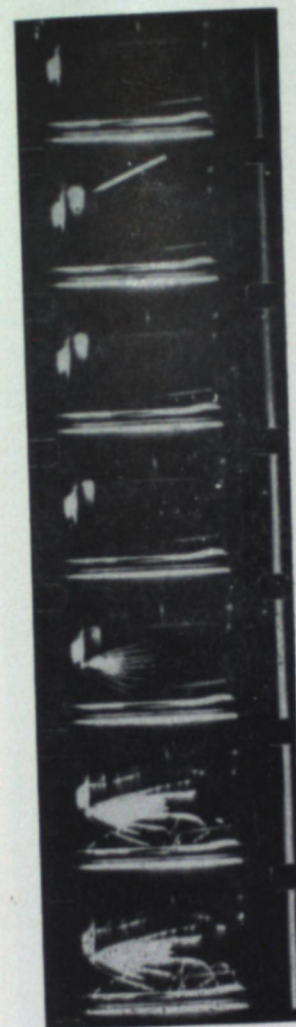


Рис. 2. Фотография
отметки момента удара
(отмечены стрелкой).

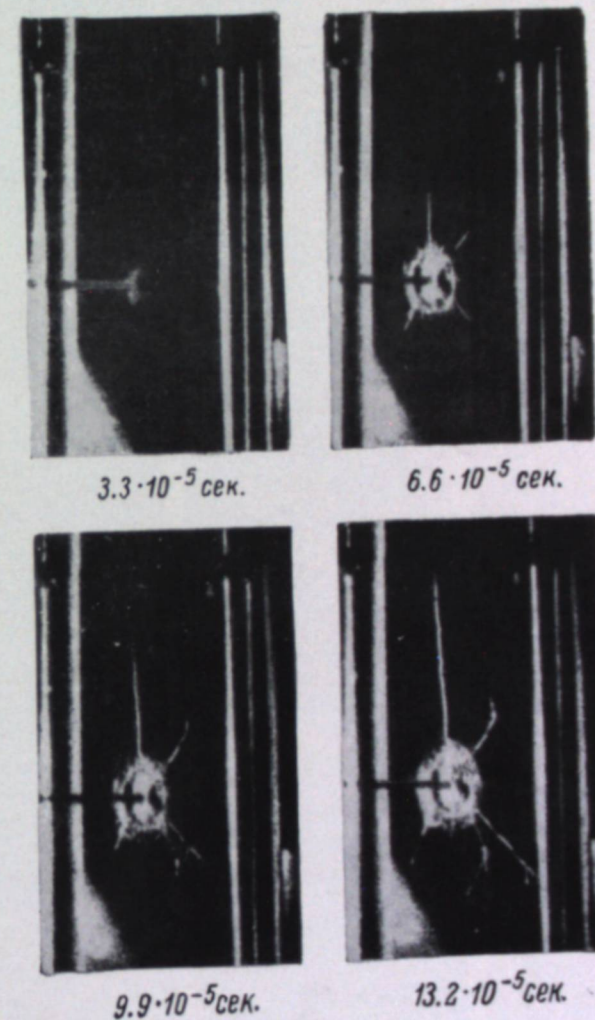


Рис. 3. Серия кадров процесса разрушения
фотостекла.

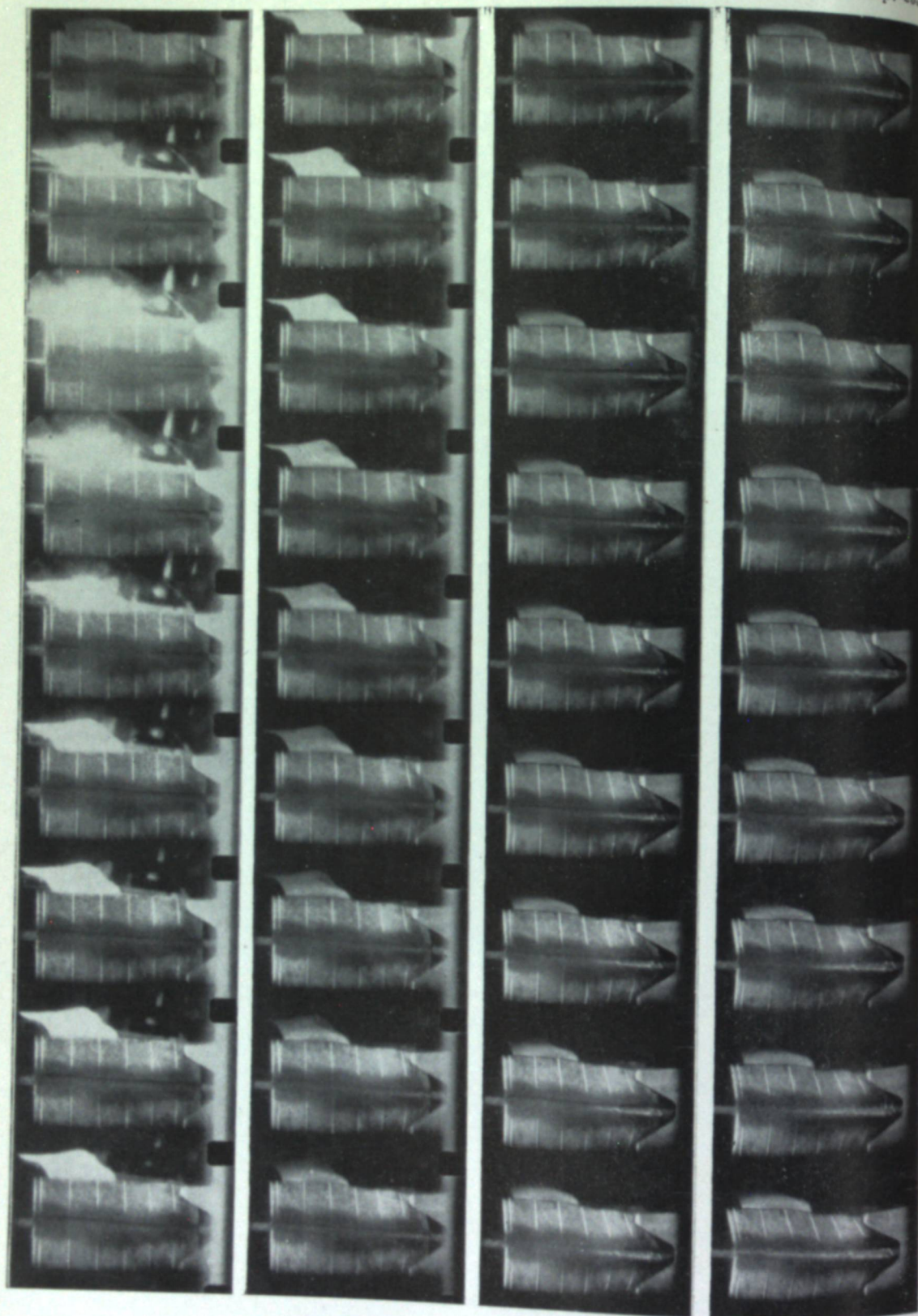


Рис. 5. Серия кадров разрушения стали У8А.

Фотопластинки 18×24 см разрушались под действием взрывного удара, а для регистрации бегущих трещин применялся фоторегистратор СФР-1. Образцы предварительно нагружались по схеме чистого изгиба последовательно от минимальных напряжений до критических. При взрыве электродетонатора тонкий стальной боек передавал удар на край или в середину образца, и из очага разрушения или района, близкого к нему, распространялась одна или несколько трещин. Принципиальная схема опыта сохранялась такой же, как показано на рис. 1, с той лишь разницей, что стеклянная пластинка устанавливалась вертикально, а удар наносился по горизонтальному направлению. На рис. 3 (см. вклейку, стр. 232) показана серия кадров процесса разрушения. Для освещения применялась специально смонтированная импульсная лампа из десяти ламп-вспышек типа ИФК. Скорости регистрации составляли 60 000—240 000 кадров/сек. Покадровая обработка производилась на инструментальном микроскопе или на фотокопиях. Погрешность измерения длины трещины не превышала при этом 5%.

В результате съемок установлено: 1) средняя скорость разрушения растет с увеличением массы груза; 2) рост трещин неравномерный; явно выражена скачкообразность его, вплоть до значительных по времени остановок роста; длительность обычных остановок порядка $(0.25—0.40) \cdot 10^{-3}$ сек., но имелись случаи остановок до $150 \cdot 10^{-3}$ сек.; скорости роста трещин колебались от 0 до 250 м/сек.; 3) скорости роста трещин нарастают к концу образца, т. е. трещины постепенно разгоняются.

Обработка съемок с отметкой момента удара показала, что и в таком хрупком материале, как стекло, имеется временная задержка разрушения (для случая монолитного стекла). Так, при скорости приложения нагрузки 0.45 м/сек. она составляет $358 \cdot 10^{-5}$ сек., при скорости же 6.4 м/сек. — $65 \cdot 10^{-5}$ сек. (рис. 2), т. е. увеличение скорости приложения нагрузки в 14.2 раза уменьшает задержку начала разрушения почти в 6 раз. В случае надрезанного образца задержка практически отсутствует.

Скачкообразность роста трещин сохраняется и при взрывном разрушении стекла, когда скорости движения трещины составляют 2000—2500 м/сек. Имелись случаи распространения таких трещин со скоростями 3000—3300 м/сек., что приближается к скоростям распространения поперечных волн в стекле и, по-видимому, к предельным скоростям для стекла.

В случае предварительного нагружения по схеме чистого изгиба максимальные зарегистрированные скорости движения трещин растут с ростом величины упругих напряжений до $\sigma = 1.5$ кг/мм², в дальнейшем стабилизируются, достигая скорости 2400 м/сек.

Исследование кинетики разрушения стали

Для исследования процесса разрушения сталей под действием динамических нагрузок был также использован метод высокоскоростной киносъемки. Методика исследования при этом значительно усложнялась из-за очень малой фотогеничности трещины на поверхности металла в условиях обычной съемки. Как и в случае стекла, образцы разрушались под действием удара падающего груза.

Схема испытания представлена на рис. 4. Образец 4 в виде пластины с размерами $100 \times 250 \times 7$ мм с продольным надрезом устанавливался на ноже 5. На одном из концов образца ставился П-образный боек 3, который передавал на образец удар груза Р; в результате образец деформировался и на его краю в надрезе зарождалась трещина, которая распространялась вдоль всего надреза. Процесс регистрировался на кинолентку типа Д камерой СКС-1М 1 через зеркало 2, наклоненное под углом 45° к плоско-

сти образца. Зеркало 2 было смещено относительно образца, а камера устанавливалась в горизонтальной плоскости под углом θ к плоскости зеркала, что позволяло зарегистрировать на киноплёнке также и процесс пластической деформации образца. Применялись два осветителя 6 с лампами накаливания по 1000 Вт каждая с направлением света вдоль надреза образца.

В результате применения такой схемы, а также специальной обработки поверхности надреза образца (травление 40%-й азотной кислотой или напыление сажи) было достигнуто повышение фотогеничности раскрывающейся при изгибе трещины на поверхности металлического образца.

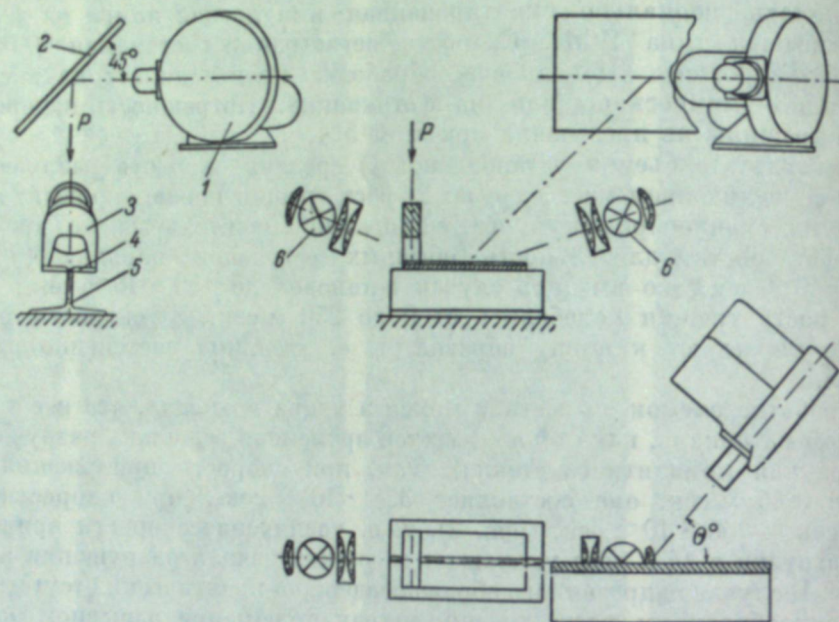


Рис. 4. Схема высокочастотной киносъемки трещин в стальных образцах.

Для определения чувствительности метода к такой раскрывающейся трещине проводились опыты с надломом образца. Измерение зарегистрированной на негативе остановившейся трещины и сравнение этих измерений с действительной трещиной на образце показали, что метод «чувствует» трещину лишь при ее поперечных размерах 0,05 мм. Меньшее раскрытие трещины не разрешается оптической системой камеры СКС-1М и негативной киноплёнки типа Д. Если фронт трещины уходит вперед от предельного разрешаемого размера в среднем на 1 см, то скорости трещины, измеренные при покадровом анализе, меньше действительных на 40—45 м, что и определяет погрешность метода.

Для отметки на негативе начального момента процесса использовалась импульсная вспышка, которая срабатывала в момент соприкосновения груза с бойком. Сечения образца отмечались узкими бумажными полосками, наклеенными поперек образца, или неглубокими надпилами на поверхности. Расстояние между двумя смежными сечениями составляло 40 мм. Таким образом, при длине образца от 220 до 280 мм получалось от 6 до 8 фиксированных сечений для измерения процесса распространения пластической деформации вдоль образца. Точность измерения угла пластической деформации была в пределах $\pm 20'$.

Исследовался ряд углеродистых сталей с содержанием углерода от 0,17 до 0,8%. Выяснялось влияние массы груза, предварительной деформации образца и влияние концентратора напряжений на кинетику

разрушения. Во всех случаях оценивалась задержка разрушения, строились графики роста трещин и распространения пластической деформации.

Образцы из стали 35ХГ2 с круглым надрезом разрушались грузами весом 25, 33,5 и 44,3 кг, падающими с высоты 2 м. Было отмечено уменьшение задержки начала разрушения с $320 \cdot 10^{-5}$ сек. для груза в 25 кг до $190 \cdot 10^{-5}$ сек. при грузе 44,2 кг. Средняя скорость разрушения сохранялась при всех грузах практически одинаковой. На конечных этапах разрушения скорости достигали 700 м/сек.

Предварительная деформация образцов значительно уменьшала задержку начала разрушения. Так, например, при предварительной деформации до угла 120° задержка уменьшалась в 3 раза по сравнению с углом предварительной деформации 160° . При этом наблюдалось увеличение конечных скоростей разрушения.

Влияние формы концентратора напряжений изучалось на образцах с круглыми и треугольными надрезами различных размеров.

На рис. 5 (см. вклейку, стр. 233) представлена серия кадров разрушения стали У8А.

На основании методик, приведенных в настоящей работе, авторами были выполнены исследования кинетики роста трещин в стекле, стали и сталините, опубликованные в разных журналах.¹

¹ ФММ, 12, 5, 1962; 13, 1, 1962; ДАН СССР, 142, 1, 1962; 143, 1, 1962; Изв. вузов, Физика, 1, 1962.

В. Н. КОЛОГРИВОВ, А. А. АНЧУРОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ НА СПЕКТРОГРАФЕ СП-75

Известно, что применение фотографических методов исследования по сравнению с фотоэлектрическими дает возможность получения большей информации за один опыт и более наглядно.

Однако до настоящего времени сведения о спектральном составе излучения и отсюда о температуре детонирующего вещества достаточно надежно могли быть получены только с помощью фотоэлектрической регистрации [1, 2, 3].

Попытки применить фотографию [4, 5] были неизбежно связаны с довольно грубой постановкой опытов, поскольку отсутствовал скоростной светосильный спектрограф. С помощью же фотоэлектрической регистрации спектр излучения исследовался в лучшем случае в четырех довольно широких спектральных областях [1]. Таким образом, несмотря на проведенные исследования, равновесность свечения детонационного фронта в конденсированном взрывном веществе (сокращенно «ВВ») представлялась недостаточно доказанной.

Можно было, в частности, предполагать, что имеет место искажение спектрального состава света, исходящего из зоны детонации, за счет поглощения в ударном фронте, или что наряду со сплошным спектром присутствуют отдельные линии излучения.

После создания нового светосильного спектрографа СП-75 [6] стало возможным более точное и подробное изучение спектров детонационных волн фотографическими методами.

Настоящая работа посвящена применению фотографической фотометрии к исследованию спектров детонации при работе на спектрографе с временной разверткой.

Постановка опытов и метод измерений

Свечение детонационной волны регистрировалось по схеме А на рис. 1. Стеклопластиковая трубка (длиной 200 и внутренним диаметром $23 \div 24$ мм) с приклеенными пицевыми стеклами на торцах заполнялась жидким ВВ. Средняя часть трубки изображалась проецирующим объективом прибора в плоскости спектрально-временной щели. Последняя вырезала из изображения торца заряда прямоугольный участок. В приборе изображение этого прямоугольного участка разлагалось в спектр. Развертка во времени осуществлялась за счет вращения колеса-кассеты спектрографа в момент взрыва.

Таблица 1

Установочные данные спектрографа при записи спектров

Объект	Детонационная волна			Ленточная лампа, $T_H = 2765^\circ \text{K}$, $T_C = 3200^\circ \text{K}$
	нитро-метана	тетрани-тротметана	смесь нитро-метана и тетра-нитро-метана	
Высота щели (мм)	1.0 0.5	0.5	0.5	1.0
Скорость вращения колеса-кассеты (тыс. об./мин.)	8.0 4.0	4.0	4.0	3.0
Время экспонирования фотослоя (мксек.)	4	4	4	10
Ширина щели (мм)	0.10	0.40	0.07	0.30
Частота спектра (ангстремы)	8	30	6	23

Примечание. T_H — яркостная температура ленты лампы; T_C — цветовая температура.

В табл. 1 представлены установочные данные спектрографа при записи спектров. Следует добавить, что уменьшение «заряд-щель» спектрографа было около 20 крат. Длина спектра (решетка 200 штр./мм) около 20 мм; дисперсия $140\text{--}150 \text{ \AA}/\text{мм}$; длина развертки во времени 1.5—3 мм.

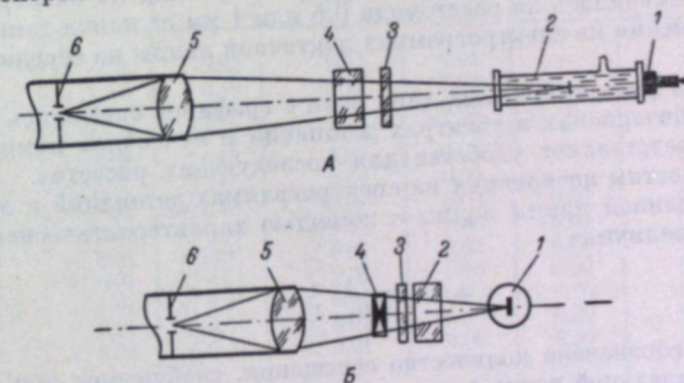


Рис. 1.

А — схема записи спектров детонации: 1 — инициирующая таблетка из прессованного гексогена и электродетонатор; 2 — стеклянная трубка, заполненная исследуемым взрывчатым веществом; 3 — световая линза, защищающая иллюминатор от осколков трубки; 4 — клиновидная пластинка, защищающая иллюминатор (конденсаторный) объектива спектрографа СП-75; 5 — проецирующий объектив прибора СП-75. Б — схема записи спектров ленточной лампы: 1 — ленточная лампа СИ-14; 2 — стекло иллюминатора; 3 — голубой светофильтр СЗС-17 толщиной 5 мм; 4 — механический затвор, выделяющий один оборот колеса-кассеты спектрографа СП-75; 5 и 6 — то же, что в схеме А.

При записи спектров детонации обеспечивалось заполнение светом объективов спектрографа.

Применение каких-либо затворов для отсекаания свечения воздушной ударной волны оказалось излишним, так как длительность его была много меньше времени одного оборота колеса-кассеты.

Спектр ленточной лампы, с которым сравнивался спектр детонации, записывался по схеме Б на рис. 1.

С помощью голубого светофильтра СЗС-17 уменьшалась освещенность в красной области спектра ленточной лампы, чтобы избежать передержек. Механический затвор обеспечивал запись спектра ленточной лампы за время, меньшее, чем один оборот колеса-кассеты.

При записи спектра лампы также обеспечивалось заполнение апертуры прибора. Установочные данные спектрографа в этом случае приведены в табл. 1.

Фотографирование спектров детонации и ленточной лампы производилось на фотослое Панхром Х чувствительностью 1200 ед. Аэро-ГОСТА.

Как известно [7], форма характеристической кривой выбранного фотослоя практически не меняется с длиной волны, поэтому для фотометрической обработки при всех длинах волн использовалась одна характеристическая кривая.

Для построения последней на сенситометре СР-16 фотографировались сенситограммы с временем экспозиции 10 мксек. за красным светофильтром.

Проявление сравниваемых спектрограмм детонации и ленточной лампы и сенситограмм производилось одновременно. Равномерность проявления по поверхности фотослоя обеспечивалась перемешиванием проявителя резиновой щеткой.

Обработка спектрограмм заключалась прежде всего в измерении плотности почернения фотослоя для разных длин волн и построении соответствующих графиков. График строился в координатах $D=f(x)$, где D — плотность почернения, x — расстояние фотометрируемого участка от центра линии ртути 5461 Å, которая впечатывалась перед каждой записью спектра. Связь между координатой x и длиной волны определялась по спектру дуги железа. Плотность почернения на спектрограммах детонации измерялась на расстоянии 0.5 или 1 мм от конца записи; плотность почернения на спектрограммах ленточной лампы на середине записи по времени.

Затем для ряда выбранных длин волн с графиков снимались значения плотностей почернения в спектрах детонации и ленточной лампы. Такая операция представляет удобства для последующих расчетов.

По плотностям почернения на спектрограммах детонации и ленточной лампы для данной длины волны с помощью характеристической кривой измерялась величина

$$\Delta_\lambda = \lg \frac{H_{\lambda d}}{H_{\lambda l}}, \quad (1)$$

где через H обозначено количество освещения, сообщаемое при фотографировании отдельной точки фотослоя; буквой λ отмечается длина волны; буквы d и l показывают, что величина относится к спектру детонации и ленточной лампы соответственно. Эти обозначения будут постоянно использоваться.

Далее производился расчет, исходя из следующих соображений. Очевидно,

$$\begin{aligned} H_{\lambda d} &= E_{\lambda d} \cdot \tau_\lambda, \\ H_{\lambda l} &= E_{\lambda l} \cdot \tau_\lambda. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь через E обозначена освещенность, через τ — время экспонирования отдельной точки фотослоя.

Пользуясь связью освещенности изображения сплошного спектра и яркости объекта для спектрографа [8], можем написать в нашем случае

$$\left. \begin{aligned} E_{\lambda d} &= k_\lambda \cdot b_{\lambda d} \cdot l_{\text{ш}d}, \\ E_{\lambda l} &= k_\lambda \cdot b_{\lambda l} \cdot l_{\text{ш}l} \cdot T_\lambda, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где k_λ — коэффициент, пропорциональный светосиле и дисперсии спектрографа; b_λ — спектральная плоскость яркости излучения; $l_{\text{ш}}$ — ширина

щели спектрографа; T_λ — коэффициент пропускания голубого светофильтра СЗС-17.

Из (1), (2), (3) нетрудно получить:

$$\lg b_{\lambda d} = \Delta_\lambda + \lg b_{\lambda l} - D_\lambda + \text{const}, \quad (4a)$$

где через D_λ обозначена плотность голубого светофильтра.

Выражение (4a) получено в предположении, что поглощением невозмущенного жидкого ВВ можно пренебречь. В противном случае поглощение следует учитывать.

Расчетное выражение с учетом поглощения ВВ принимает вид

$$\lg b_{\lambda d} = \Delta_\lambda + \lg b_{\lambda l} - D_\lambda + D_{\text{ВВ}} + \text{const}, \quad (4б)$$

где через $D_{\text{ВВ}}$ обозначено поглощение невозмущенного ВВ.

Таблица 2

Поглощение жидких взрывчатых веществ и поправки в расчетах на поглощение

Длина волны, ммк	Плотность слоя толщиной 49.8 мм, измеренная на спектрофотометре СФ-4			Величина поправки на поглощение взрывчатых веществ $D_{\text{ВВ}}$		
	нитрометана	тетранитрометана	смесь нитрометана и тетранитрометана	нитрометана	тетранитрометана	смесь нитрометана и тетранитрометана
425	0.04	0.82	0.33	0.04	—	—
437	0.03	0.19	0.12	0.03	—	0.14
450	0.02	0.06	0.06	0.02	—	0.07
465	0.01	0.01	0.03	0.01	—	0.04
480	< 0.01	< 0.01	0.02	0.00	—	0.02
498	< 0.01	< 0.01	0.01	0.00	—	0.01
515	< 0.01	< 0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
535	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00	0.00
555	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00	0.00
580	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00	0.00
602.6	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00	0.00
630	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00	0.00
660	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00	0.00

Примечание. Прочерки (—) в значениях $D_{\text{ВВ}}$ означают, что для данной длины волны $\lg b_{\lambda d}$ не рассчитывался.

Измерение поглощения изучаемых взрывчатых веществ на спектрофотометре (табл. 2) показывает, что заметная поправка должна вноситься лишь для фиолетового участка спектра.

Необходимое для вычислений по (4a) и (4б) значение $\lg b_{\lambda d}$ рассчитывалось по формуле Вина, исходя из цветовой температуры ленточной лампы в рабочем режиме. С помощью пирометра ОП-48 была измерена яркостная температура лампы, учтено отражение от стенок баллона и по связи яркостных и цветовых температур для вольфрама [9] найдена цветовая температура.

Плотность D_λ светофильтра СЗС-17 была измерена на спектрофотометре СФ-4.

По определенным значениям $\lg b_{\lambda d}$ строились графики функции $F(\lambda, T) = \lg [b_{\lambda d} \cdot \lambda^5]$ в зависимости от $\frac{1}{\lambda}$. Как известно, для источников света, удовлетворяющих закону Вина, в этом случае должна получиться прямая с отрицательным наклоном. Тангенс угла наклона этой прямой $\text{tg } \varphi$ связан с температурой по распределению соотношением:

$$T = \frac{6240}{\lg \varphi}, \quad (5)$$

где T получается в градусах Кельвина, если при построении графика, длина волн выражалась в микронах. С помощью выражения (5) рассчитывалась температура.

Оценка погрешностей показывает, что максимальная ошибка при подсчете $\lg b_{\lambda d}$ может составить 0.05—0.07, откуда относительная ошибка в значении b_{λ} около 15%; максимальная ошибка при расчете температуры по (5) около 6—10%.

Результаты

На рис. 2 (см. вклейку, стр. 240) приведен увеличенный отпечаток спектрограммы при взрыве нитрометана. Из него следует, что сначала регистрируется свечение инициирующей таблетки гексогена, затем детонационной волны в жидкости, далее свечение обрывается, что соответствует помутнению стекла, сжимаемого ударной волной, и, наконец, возникает волна в воздухе. Свечение последней слабо и кратковременно. Регистрируется лишь сильно расширенный дублет натрия 5890—5896 Å и свечение вблизи него.

Результаты расчета функции $F(\lambda, T)$ представлены на рис. 3. Как видно, точки хорошо укладываются на прямые, за исключением крайней красной точки ($\lambda=660$ мкм). Вблизи этой длины волны чувствительность фотослоя резко падает, измерения не точны.

Вычисленные нами по графикам рис. 3 температуры «по распределению» сведены в табл. 3.

Таблица 3
Результаты измерения температуры (в тыс. °К)

Вещество	Средняя температура «по распределению»	Яркостная температура ($\lambda = 602.5$ мкм)	Цветовая температура	
			по [2, 3]	по [1]
Нитрометан	3.80 ± 0.10	4.04 ± 0.4	3.7 ± 0.15	3.8
Тетранитрометан	2.83 ± 0.10	2.81 ± 0.3	3.1 ± 0.15	—
Смесь 35% тетранитрометана + 65% нитрометана	4.65 ± 0.10	—	4.6 ± 0.15	—

В этой же таблице приводятся значения яркостных температур нитрометана и тетранитрометана для длины волны в 602.5 мкм.

Яркостные температуры были рассчитаны по экспериментально измеренному отношению количеств освещения на спектрограммах чистых жидкостей и смеси в предположении, что смесь излучает как абсолютно черное тело с температурой $4.65 \cdot 10^3$ °К. Выражение для расчета отношения яркостей легко получается из соотношений (2) и (3). Все спектры детонации фотографировались в одинаковых условиях и все сравниваемые спектрограммы проявлялись одновременно. Очевидно, что значения яркостных температур получены с большей ошибкой, чем значения цветовых. На рис. 4 представлено относительное распределение энергии по опытным данным.

Линейность зависимостей $F(\lambda, T)$ от $\frac{1}{\lambda}$ свидетельствует о серости излучения фронтов детонационных волн, а совпадение яркостных и цветовых температур (табл. 3) показывает, что коэффициенты серости исследуемых веществ близки друг другу.

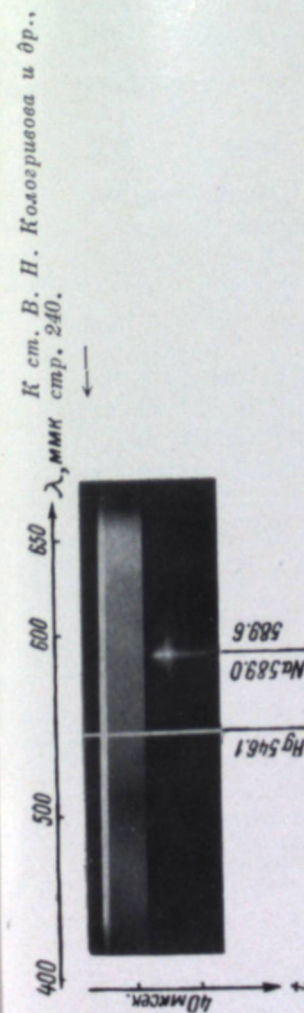


Рис. 2. Спектрограмма свечения фронта детонационной волны нитрометана.

К ст. Л. К. Малышева,
стр. 246 и 248.

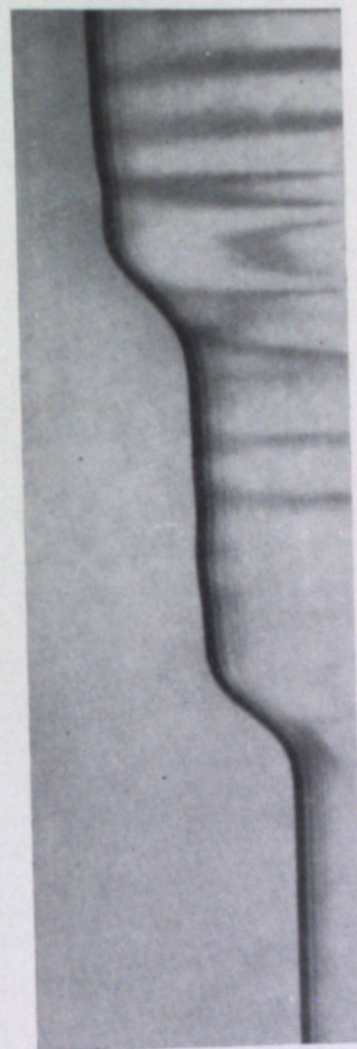


Рис. 4. Кинограмма перемещения свободного конца ударника.
Начало записи — слева.



Рис. 3. Кинограмма волны напряжения.

Начало процесса — справа, скорость развертки $U = 2000$ м/сек.

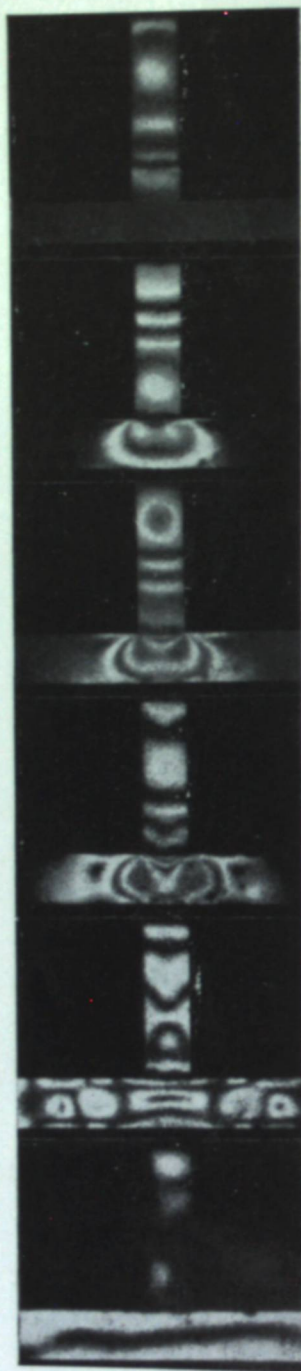


Рис. 6. Фотографии напряженного состояния ригеля рамы.

Интервал времени между снимками $\Delta t = 7.2 \cdot 10^{-6}$ сек.

К ст. Л. К. Малышева и др., стр. 248.

Полученные спектрограммы позволяют произвести измерения яркостных температур свечения детонации и непосредственно по сравнению с ленточной лампой. Однако по причинам технического характера результаты такого сравнения, полученные нами (табл. 4), недостаточно точны.

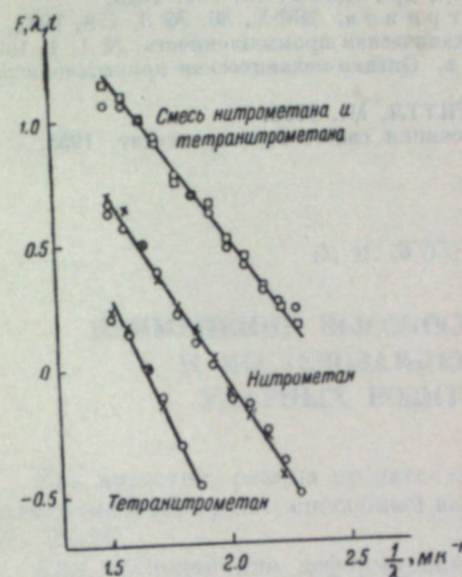


Рис. 3. Графики функции $F(\lambda, T)$ в зависимости от $\frac{1}{\lambda}$, по экспериментальным данным.

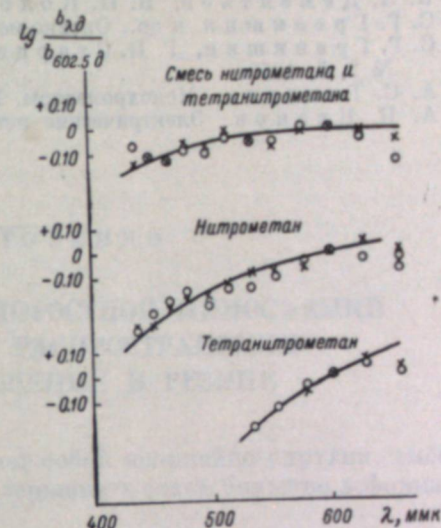


Рис. 4. Относительное распределение энергии в спектрах детонационных волн.

Значки — эксперимент; сплошные линии — распределение, рассчитанное по формуле Вина для измеренных значений температур «по распределению».

Результаты табл. 4 допускают существование коэффициентов серости от 1 до 0.5—0.25.

Для окончательного заключения о равенстве яркостных и цветовых температур свечения детонационной волны необходимы более точные измерения.

Таблица 4

Яркостные температуры
(в тыс. °K; при сравнении с ленточной лампой)

λ , ммк	450	500	650	$T_{\text{л}}$	$\lg \frac{b_{\lambda, T_{\text{л}}}}{b_{\lambda, T_{\text{ц}}}}$
Нитрометан	3.6 ± 0.5	3.5 ± 0.5	3.4 ± 0.5	3.8 ± 0.4	-0.28 ± 0.30
Смесь нитрометана и тетранитрометана	4.15 ± 0.6	4.1 ± 0.6	3.9 ± 0.6	4.65 ± 0.4	-0.39 ± 0.30

Авторы благодарят канд. физ.-мат. наук С. Г. Гренишина, предоставившего им возможность работы на спектрографе СП-75, доктора техн. наук А. С. Дубовика и канд. физ.-матем. наук И. М. Воскобойникова за помощь и советы при постановке и проведении опытов.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. C. Gibbon и др., J. Appl. Phys., 29, 4, 628, 1958.
2. И. М. Воскобойников, А. Я. Апин, ДАН СССР, 130, 4, 804, 1960.
3. И. М. Воскобойников, Г. С. Соснова, ПМТФ, № 4, 133, 1961.
4. М. А. Аленичев, А. Ф. Беляев и др., ЖЭТФ, 16, 990, 1946.
5. В. А. Дементьев, В. Н. Кологривов, ЖФХ, 36, № 3, 458, 1962.
6. С. Г. Гренишин и др., Оптико-механическая промышленность, № 1, 1, 1961.
7. С. Г. Гренишин, Г. П. Старцев, Оптико-механическая промышленность, № 2, 5, 1956.
8. А. С. Топорев. Монохроматоры. ГИТТЛ, М., 1955.
9. А. П. Иванов. Электрические источники света. Госэнергоиздат, 1955.

П. П. МОСТОВЕНКО

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ К ИССЛЕДОВАНИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В РЕЗИНЕ

Как известно, резина представляет собой нелинейно-упругий, высокоэластичный материал, способный выдерживать очень большие деформации (до 800 %).

Для исследования деформированного состояния в динамике был использован метод скоростной киносъемки, который дал положительные

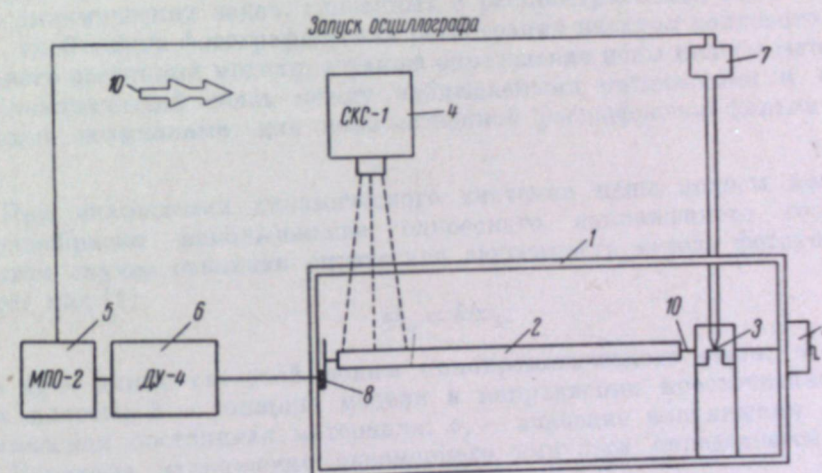


Схема установки.

1 — металлическая рама; 2 — резиновый шнур; 3 — нож с наковальней; 4 — камера СКС-1; 5 — осциллограф МПО-2; 6 — усилитель ДУ-4; 7 — падающий груз; 8 — балка равного сопротивления с тензодатчиками; 9 — лебедка; 10 — стреловидные держатели.

результаты. Для экспериментов была изготовлена установка (см. рисунок), представляющая собой удлиненную силовую раму, вдоль которой при помощи лебедки растягивался резиновый шнур диаметром 30 мм и длиной около 1 м. Образцы закреплялись при помощи специальных стреловидных латунных держателей. Держатель соединялся с растягивающим тросом через латунный стержень диаметром 3 мм. В качестве динамометра была использована балка равного сопротивления с наклеенными на нее тензодатчиками. После задания определенной деформации резина ударил о (за время менее 0.001 сек.) разгружалась с одного конца разрубанием латунного стержня и свободно двигалась к положению

равновесия. Этот процесс самопроизвольного сокращения и исследовался.

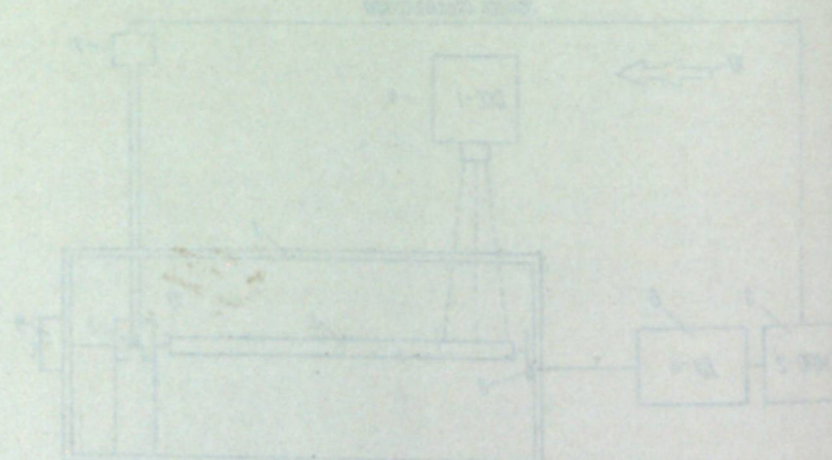
Для обнаружения фронта ударной волны, а также для определения скорости его перемещения была использована модернизированная скоростная киносъемочная камера СКС-1, позволяющая производить съемку с частотой до 16 000 кадров/сек. [1]. Снимались два объекта: а) конец движущейся резины, от которого должен был начинаться движение ударный фронт; б) выделенное в пространстве движения резины сечение.

Для того чтобы точно знать момент снятия нагрузки, была использована импульсная лампа, синхроконттакт которой замыкался в момент снятия нагрузки. Съемка производилась как в отраженном, так и в проходящем свете на пленку ДН чувствительностью 350 ед. ГОСТа.

Дешифрирование негативов показало, что нарастание диаметра происходило непрерывно, без всяких скачков, т. е. ударного фронта конечной амплитуды не было обнаружено.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Рылло, УНФ, VI, 141, 1959.



ДЕШИФРОВКА ФИЛЬМА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННОГО ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОКАМЕРОЙ СФР ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА

Л. К. МАЛЫШЕВ

Исследование напряженного состояния методом фотоупругости основано на изучении картины изохром, возникающей при прохождении поляризованного света через напряженную модель конструкции, изготовленную из оптически активного материала.

Для практического применения метода к экспериментальному решению динамических задач, связанных с распространением волн напряжений, необходима фотографическая регистрация изохром волнового напряженного состояния модели, а также определение цены полосы материала, устанавливающей связь между наблюдаемыми оптическими и механическими величинами, для количественной расшифровки фильма.

При нахождении динамического значения цены полосы материала целесообразно использование одноосного напряженного состояния. В этом случае основная оптическая зависимость метода фотоупругости имеет вид [1]

$$n\delta_0 = kh\sigma_1, \quad (1)$$

где δ_0 — длина световой волны монохроматического света; n — порядок полосы; h — толщина модели в направлении просвечивания; k — оптическая постоянная материала; σ_1 — значение напряжения.

Величина напряжения одномерного импульса определяется формулой [2]

$$\sigma_1 = \rho c_0 \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (2)$$

где ρ — массовая плотность материала; c_0 — скорость распространения продольной волны напряжения в материале; $\frac{\partial u}{\partial t}$ — скорость движения частиц материала за фронтом волны.

Используя формулы (1) и (2), получаем следующее выражение для цены полосы материала:

$$\tau_0^{(1,0)} = \frac{\tau_{\max} h}{n} = \frac{1}{2n} \rho c_0 h \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (3)$$

где $\tau_0^{(1,0)}$ — цена полосы материала, $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1}{2}$ — максимальное касательное напряжение.

Следовательно, для определения значения цены полосы материала требуется определить скорость движения частиц материала $\frac{du}{dt}$ и соответствующий этому моменту времени порядок полосы n .

Скорость перемещения частиц материала тарировочного стержня и распределение изохром волны напряжения фиксировались динамической фоторегистрирующей установкой, состоящей из высокоскоростной кинокамеры СФР, импульсного источника света с лампой ИФК-80000 и электронного реле задержки [3]. Для возможности регистрации скоростей перемещений частиц материала использовался дополнительный длиннофокусный объектив И-11М, позволивший увеличить масштаб изображения в 15 раз по сравнению с масштабом его при использовании только оптической системы кинокамеры. Для устранения погрешностей изображения производилась специальная юстировка объектива и оптической системы кинокамеры.

Тарировочные стержни изготавливались из органического стекла и нагружались с торца взрывом плоского заряда азида свинца (рис. 1). Применение составных стержней позволило отсечь хвостовую часть им-

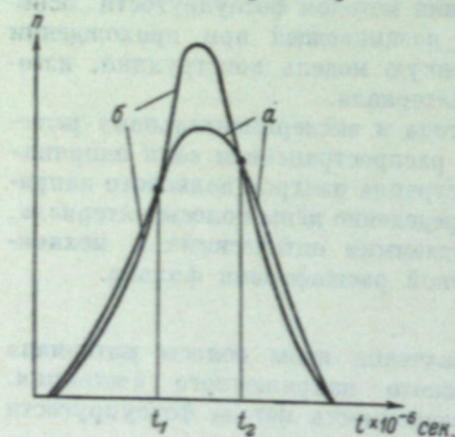


Рис. 3. Форма импульса.

а — по продольной грани ударника; б — по сечению, совпадающему с продольной осью ударника.

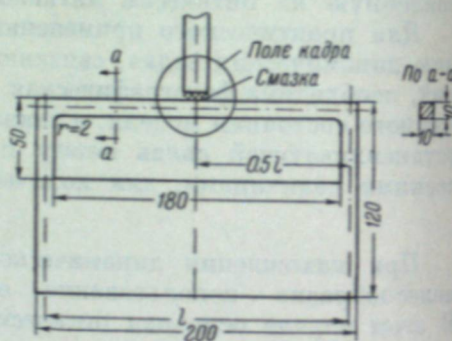


Рис. 5. Модель рамной конструкции.

пульса и получить в ударнике только основную полуволну сжатия.

На рис. 2 (см. вклейку, стр. 240) представлена кинограмма изохром волны напряжения в поперечном сечении ударника, полученная при работе камеры СФР в режиме фоторегистратора. Характер изохром свидетельствует о неравномерном распределении продольных напряжений импульса по ширине ударника и наличии небольших поперечных напряжений, появляющихся вследствие влияния продольных граней и инерции поперечного движения частиц материала. Кинограмма позволяет построить кривую «порядок полосы—время», характеризующую импульс напряжения.

Сопоставляя указанные кривые для продольной грани ударника и сечения, совпадающего с его продольной осью (рис. 3), можно видеть, что в моменты времени t_1 и t_2 отсутствуют поперечные напряжения и напряженное состояние является одноосным.

Согласно [2], распределение скоростей перемещения частиц материала в импульсе подобно распределению давлений. Поэтому значение скоростей частиц материала в указанные моменты времени можно найти,

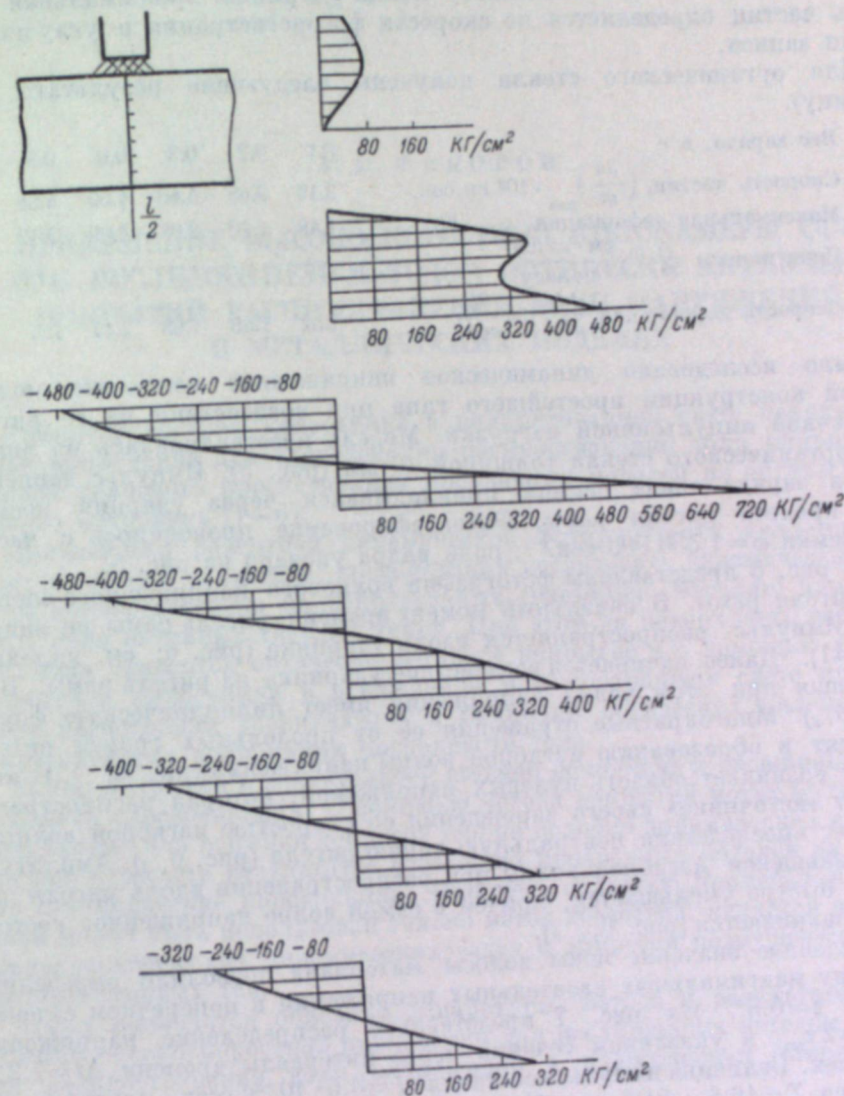


Рис. 7. Эпюры напряжений $\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau_{\max}$ в поперечном сечении ригеля рамы.

зная величину максимальной скорости частиц. Для определения $\left(\frac{du}{dt}\right)_{\max}$ фоторегистрировались перемещения свободного конца ударника. Кинограмма «перемещение—время» приводится на рис. 4 (см. вклейку, стр. 240). Горизонтальные площадки соответствуют состоянию покоя свободного конца ударника. Разность уровней площадок характеризует величину перемещения свободного конца ударника. Максимальная скорость частиц определяется по скорости фоторегистрации и углу излома линии записи.

Для органического стекла получены следующие результаты (см. таблицу).

Вес заряда, в г	0.1	0.2	0.3	0.6	0.9
Скорость частиц, $\left(\frac{du}{dt}\right)_{\max} \cdot 10^3$ см/сек.	3.19	3.65	4.40	4.50	4.58
Максимальная деформация, $\epsilon_{\max}, \%$	1.48	1.70	2.05	2.09	2.13
Цена полосы $\tau_{\frac{1}{2}}^{(1,0)}, \frac{\text{см} \cdot \text{кг/см}^2}{\text{полосу}}$	120	118	117	120	118
Скорость деформации, $\frac{d\epsilon}{dt} \cdot 10^6 \frac{\%}{\text{сек.}}$	1.52	1.55	1.68	2.17	2.3

Было исследовано динамическое напряженное состояние модели рамной конструкции простейшего типа при воздействии на ее ригель поперечной импульсивной нагрузки. Модель изготавливалась из листового органического стекла толщиной 10 мм (рис. 5). Импульс давления взрыва заряда азидо свинца прикладывался через ударник посередине пролета ригеля рамы. Фотографирование проводилось с частотой съемки $\omega = 1\,350\,000$ сек.⁻¹; поле кадра указано на рис. 5.

На рис. 6 представлены фотографии волнового напряженного состояния ригеля рамы. В начальный момент времени ригель рамы не напряжен. Импульс распространяется вдоль ударника (рис. 6; см. вклейку, стр. 241). Далее начинается воздействие ударника на ригель рамы. Возникающая при этом волна напряжения имеет цилиндрическую форму (рис. 6, 2). Многократные отражения ее от продольных граней ригеля приводят к образованию изгибной волны напряжения (рис. 6, 3). В этот момент возникает область нулевых напряжений, которая распространяется от «источника» своего зарождения со скоростью изгибной волны и образует впоследствии нейтральную линию ригеля (рис. 6, 4). Амплитуда образовавшейся изгибной волны при распространении вдоль ригеля довольно быстро уменьшается, причем в самой волне напряженное состояние выравнивается (рис. 6, 5, 6).

Найденное значение цены полосы материала позволило определить величину максимальных касательных напряжений в поперечном сечении ригеля $\tau = 0.5l$. На рис. 7 представлено распределение напряжений $\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau_{\max}$ в указанном сечении через интервалы времени $\Delta t = 7.2 \times 10^{-4}$ сек. Величина импульса составила $I = 0.6 \cdot 10^{-2}$ кг сек., длительность импульса $T = 16.8 \cdot 10^{-4}$ сек. На нижней продольной грани ригеля распределение изохром определяет величину действующего растягивающего напряжения σ_1 , так как здесь $\sigma_2 = 0$. О величине контурных напряжений на верхней продольной грани ригеля можно судить после окончания действия импульса. Максимальные напряжения в ригеле рамы возникли в данном сечении в первые моменты времени после приложения нагрузки. Хотя величина этих напряжений превосходит статический предел прочности материала модели, ввиду кратковременности их действия, пластических деформаций и нарушений целостности ригеля не наблюдалось.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Фрохт. Фотоупругость. Гостехиздат, 1948.
2. Г. Кольский. Волны напряжения в твердых телах. ИЛ, 1955.
3. Л. К. Малышев. Строительная механика и расчет сооружений, 2, 1961.

А. П. ФЕДОРОВ

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОКАМЕРЫ СФР ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Высокоскоростная киносъемка в поляризованном свете находит широкое применение для исследования распространения волн напряжений методом сквозного просвечивания прозрачных моделей из оптически активного материала [1—6].

Дальнейшим развитием динамической фотоупругости является разработка методов и средств, позволяющих исследовать динамические процессы непосредственно на непрозрачных (например, металле) или оптически мало активных твердых телах. При этом на поверхность исследуемого тела наносится оптически активное покрытие и с помощью высокоскоростной киносъемки в отраженном или проходящем свете производится регистрация возникающих в покрытии оптических явлений, характеризующих деформации поверхности тела.

Метод покрытий в значительной степени дополняет и расширяет метод сквозного просвечивания. С помощью метода покрытий могут быть получены данные для решения вопросов теории подобия динамических явлений с целью пересчета результатов испытания прозрачных моделей на натурные металлические конструкции. Наконец, областью применения, в которой может быть использован только метод покрытий, является решение упруго-пластических динамических задач и вопросов разрушения непрозрачных твердых тел.

Ниже приводится описание аппаратуры, метода и результатов применения высокоскоростной киносъемки для исследования методом покрытий распространения волн напряжений в алюминиевых стержнях и моделях.

Аппаратура

Опыты проводились на оптической установке, собранной по V-образной схеме, показанной на рис. 1.

В схеме использованы все основные узлы установки, описанной в работах [3], [4], где приведены результаты исследования распространения волн напряжений в плексигласовых стержнях и пластинах.

В качестве источника света служила импульсная лампа ИФК-80 000, на которую в момент вспышки разряжалась батарея масляных конденсаторов общей емкостью 50 мкф при напряжении до 20 кв. Фотографическая регистрация осуществлялась сверхскоростным фоторегистратором конструкции ИХФ АН СССР [7]. При использовании СФР в качестве лупы времени съемка производилась с применением четырехрядной

вставки при $\sim 400\,000$ оборотах зеркала в минуту ($1\,350\,000$ кадров/сек.). Эта же скорость развертки — 2050 м/сек. применялась для щелевой фоторегистрации процессов в отдельных сечениях стержней и моделей при щели шириной 0.5 мм. Фотографирование производилось на пленку типа ДК чувствительностью около 300 ед. ГОСТа.

Вследствие кратковременности наблюдаемых явлений в установке предусмотрена строгая синхронизация момента вспышки лампы, инициирования исследуемого процесса и начала фоторегистрации. Одновре-

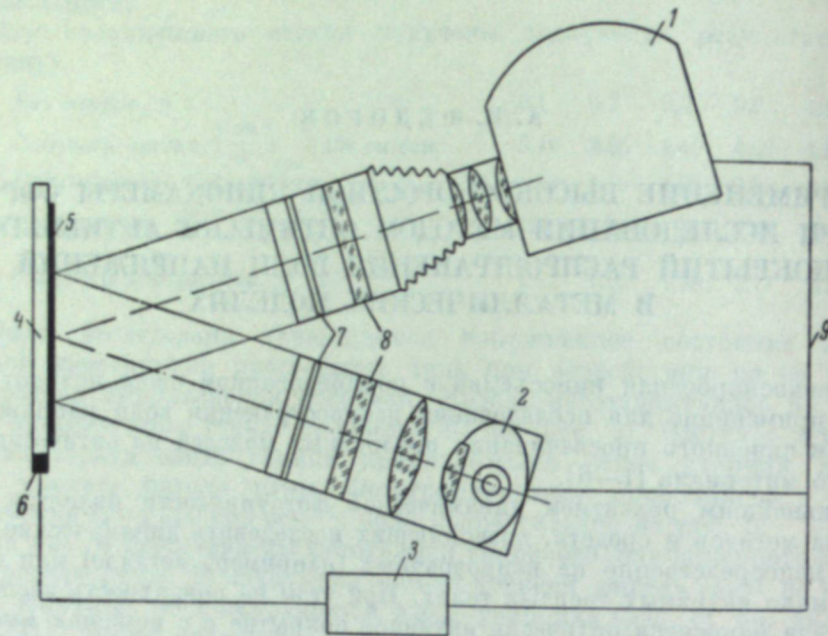


Рис. 1. Принципиальная схема отражательной фоторегистрирующей установки.

1 — кинокамера СФР; 2 — осветитель с импульсной лампой; 3 — реле задержки; 4 — исследуемая металлическая модель; 5 — оптически активное покрытие; 6 — заряд; 7 — пластинка $\lambda/4$; 8 — поляриды; 9 — электрическая цепь синхронизации.

менно с открытием затвора кинокамеры с пульта СФР подается электрический сигнал на поджиг лампы и через реле задержки на инициирование процесса.

Для создания плоской поляризации на пути падающего и отраженного лучей света установлены поляриды — поляризатор и анализатор в скрещенном состоянии. При испытании моделей со сложным напряженным состоянием выставлялись также пластинки $\lambda/4$ для создания круговой поляризации света.

Для монохроматизации светового потока использовались светофильтры ПС-7 и ОС-11. Угол между направлениями падения луча света и его отражением составлял примерно 20° .

Одновременно с оптическими исследованиями проводились измерения продольной деформации проволоочными тензометрами (база 10 мм) с записью показаний на осциллографе ОК-17М. Включение тензометров производилось по потенциометрической схеме.

В качестве оптически активных покрытий использовались пластинки толщиной $1\text{--}2$ мм из различных эпоксидных смол, наносимые методом приклейки при комнатной температуре. Составы использованных материалов указаны ниже при описании соответствующих экспериментов. Клеевой компаунд состоял из эпоксидных смол ЭД-5 и ДЭГ и полиэтиленполиамин в весовой пропорции $100 : 15 : 11.5$.

Исследование стержней

Было проведено свыше 30 опытов по исследованию распространения продольных волн напряжения в алюминиевых стержнях размерами $350 \times 10 \times 10$ мм.

При использовании камеры СФР в варианте фоторегистратора исследования для возможности сопоставления проводились в тех же сечениях стержня, что и на плексигласовых балках, результаты испытания которых описаны в работах [3], [4].

На рис. 2 (см. вклейку, стр. 252) приведена фотография, представляющая собой развертку во времени t оптических явлений, наблюдаемых в среднем сечении стержня при поперечном расположении щели.

Волна напряжения вызывалась детонацией у торца стержня заряда азида свинца весом 0.2 г. В качестве оптически активного покрытия использовалась пластинка толщиной 2.4 мм из эпоксидной смолы ЭДП (100 вес. ч.) с трикрезилфосфатом (5 вес. ч.), отвержденных малеиновым ангидридом (27 вес. ч.).

Полученная фотография позволяет найти форму импульса путем построения наблюдаемого порядка полос n в зависимости от времени, определить скорость распространения волны и т. д. На графике рис. 2, б показана форма лишь основной части импульса без следующей за ней группы высокочастотных волн. Для данного случая наибольшее двулучепреломление достигло 3 порядков полос, а продолжительность основного импульса составила величину около 12 мксек.

На рис. 3 (см. вклейку, стр. 252) приведена осциллографическая запись деформаций (верхняя кривая), вызываемых прохождением рассмотренного выше импульса, в сечении, удаленном на расстоянии 0.37 л от нагружаемого конца. Нижняя кривая представляет собой отметку времени с частотой $40\,000$ гц. Максимальное значение деформации имеет величину порядка 0.135% .

На основании данных обоих методов может быть определен динамический оптический коэффициент деформации материала покрытия по формуле

$$c_s = \frac{2d(e_1 - e_2)}{\lambda n},$$

где d — толщина покрытия; e_1, e_2 — главные деформации; n — порядок полосы; λ — длина волны монохроматического света 546.1 мкм.

Величина c_s , подсчитанная по соответствующим максимальным амплитудам деформации и порядка полос, составляет значение $c_s = 5.3 \pm \pm 5\%$. Эта величина отличается от оптического коэффициента деформации, найденного при статистических условиях нагружения и равного $c_s = 9.6 \pm 5\%$.

При вычислениях было принято, что динамический коэффициент Пуассона алюминия составляет $\mu = 0.34$, т. е. равен значению, полученному из опытов на статическое растяжение.

Наблюдение за распространением волны напряжения по стержню проводилось также при продольном расположении щели в среднем сечении стержня и на его свободном конце.

В случае продольного расположения щели в среднем сечении стержня (рис. 4; см. вклейку, стр. 252) полосы фиксируются в виде наклонных линий. Знание угла наклона полос α и скорости развертки луча по пленке v_p позволяет вычислить скорость распространения полос, а, следовательно, и скорость прохождения волны по стержню

$$v_s = \frac{v_p}{\tan \alpha}.$$

Величина скорости распространения волны может быть определена

также по фотографиям картин полос при поперечном расположении щели (рис. 2) и по осциллограммам тензометрического метода (рис. 3). В этом случае скорость волны представляет собой величину, осредненную на длине стержня, в то время как при продольной щели она определяется на базе нескольких миллиметров. Скорость волны, найденная указанными выше способами, различается незначительно и в среднем составляет $c_0 = 5300 \text{ м/сек.} \pm 2\%$.

Динамическое значение модуля продольной упругости алюминиевых стержней, согласно приближенной теории распространения волн напряжений [6], можно вычислить по выражению

$$E = \rho c_0^2,$$

где c_0 — скорость распространения волны; ρ — массовая плотность.

Тогда при $\rho = 2.63 \text{ г/см}^3$ для динамического модуля алюминия получаем значение $E = 750\,000 \text{ кг/см}^2 \pm 4\%$. Найденная величина модуля продольной упругости совпадает со значением, определенным по статической диаграмме растяжения.

Максимальное напряжение, вызываемое волной, равно $\sigma = \epsilon_{\text{max}} \cdot E = 1000 \text{ кг/см}^2$, т. е. в стержне развиваются напряжения, превышающие статистический предел текучести материала ($\sigma_{\text{тех}}^{\text{ст}} = 830 \text{ кг/см}^2$). Отсутствие остаточных деформаций в стержне, о чем можно судить по отсутствию остаточного двулучепреломления в покрытии, свидетельствует о повышении предела текучести алюминия при динамическом нагружении.

Картину полос можно использовать для непосредственного определения напряжений в металлической модели, если цену полосы протарировать в напряжениях для модели. Для картин полос, приводимых на рис. 2, 4 и 5, изменение полосы на один порядок соответствует изменению напряжений в металлическом стержне на 333 кг/см^2 .

При продольном расположении щели на свободном конце образца (рис. 5; см. вклейку, стр. 256) имеет место сложная картина полос, которая позволяет наблюдать подход волны к торцу стержня и интерференцию прямой и отраженной частей волны. Промежуток времени I—II соответствует моменту появления в сечении волны сжатия, распространению ее по направлению к свободному концу и началу отражения. В момент времени II результирующее напряжение в стержне равно нулю вследствие взаимного погашения прямой и отраженной частей волны. Промежуток времени II—III соответствует формированию отраженной растягивающей волны, распространяющейся в направлении от свободного конца. После момента времени III наблюдается подход и интерференция высокочастотных волн, следующих за главным импульсом.

На рис. 6 (см. вклейку, стр. 256) приведены отдельные кадры, полученные камерой СФР в варианте лупы времени. Промежуток времени между отдельными кадрами составляет 3.06 мксек. На фотографии зафиксировано распространение продольной волны по стержню справа налево. Полученные фотографии позволяют построить форму волны, определить напряжение в стержне, найти скорость распространения волны и т. д.

Исследование моделей

Возможность применения метода покрытий для изучения более сложных динамических задач была проверена на примерах исследования пластины, диска и кольца из алюминия при воздействии на них импульса от инициирования сосредоточенного заряда азида свинца весом от 0.03 до 0.2 г.

Фотографии получены при отсутствии светофильтров.

К ст. А. П. Федорова,
стр. 251.

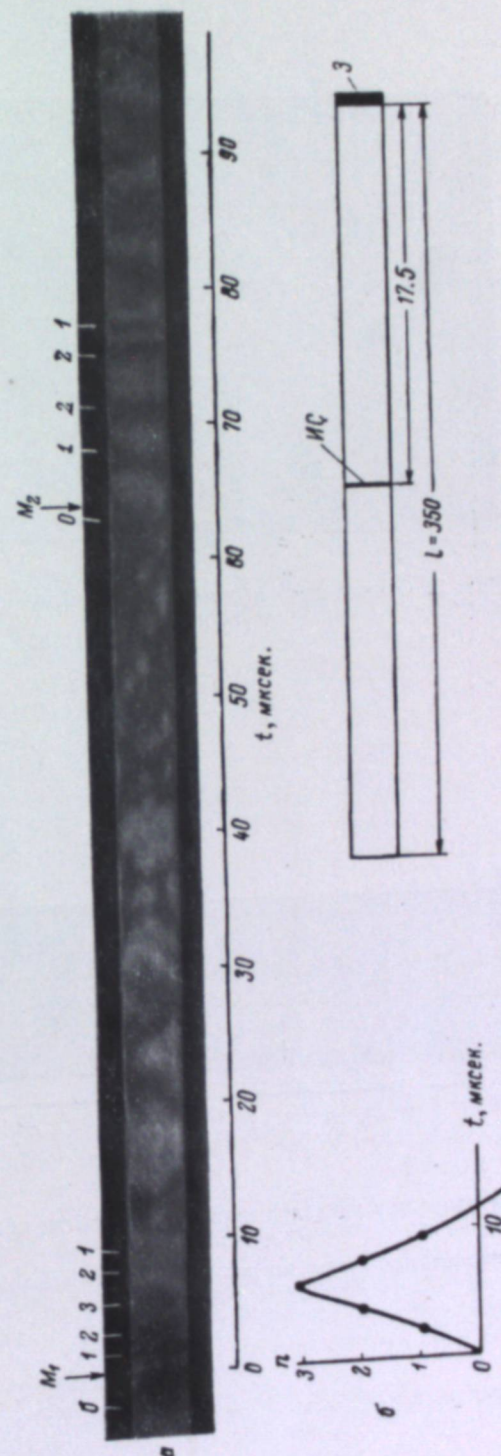


Рис. 2. Картина полос в среднем поперечном сечении стержня при работе СФР в варианте фоторегистратора.

M_1 — момент появления первичной волны сжатия; M_2 — момент прихода отраженной волны растяжения; ИС — исследуемое сечение; 3 — заряд.

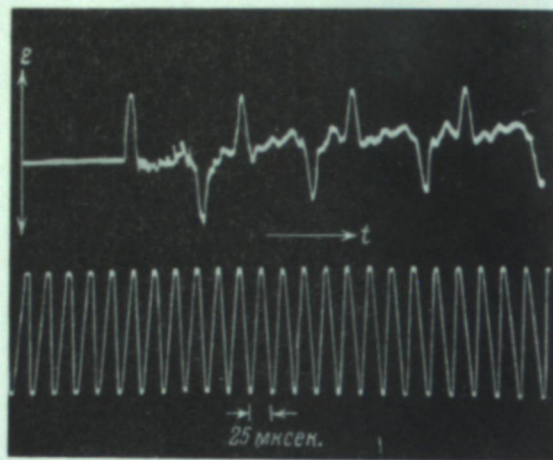


Рис. 3. Осциллограмма продольных деформаций стержня.

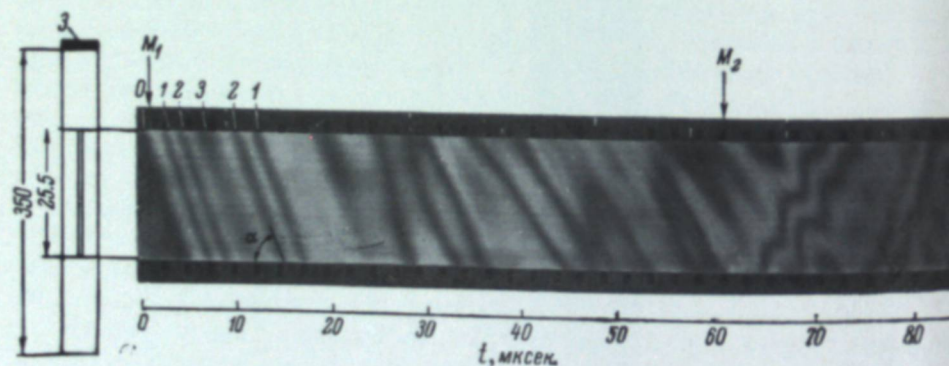


Рис. 4. Картина полос при расположении продольной щели в средней части стержня.
 M_1 — момент появления первичной волны сжатия; M_2 — момент прихода отраженной волны растяжения; 3 — заряд.

Схема нагружения диска диаметром 82 мм и толщиной 5 мм, а также фотографии, показывающие процесс распространения волнового напряжения состояния, приведены на рис. 7 (см. вклейку, стр. 257).

Покрытие изготовлено из эпоксидной смолы ЭДЖ (100 вес. ч.) и магнезового ангидрида (30 вес. ч.), его толщина равна 2.4 мм. Вес заряда составлял 0.03 г.

Картинки полос, полученные камерой СФР в варианте лупы времени (рис. 7, а), свидетельствуют о весьма сложном напряженном состоянии диска, особенно в период развития интерференционных явлений. Промежуток времени между отдельными кадрами равен примерно 0.77 мксек.

Сложная картина полос получается и при щелевой фоторегистрации диска в двух различных сечениях (рис. 7, б и в). Для надежной расшивки картин полос необходимо иметь еще цветные фотографии.

На рис. 8 (см. вклейку, стр. 257) представлены фотографии процесса распространения волны напряжений в прямоугольной пластине размером $100 \times 70 \times 5$ мм при подрыве заряда весом 0.03 г. Покрытие имеет такой же состав, как и для диска.

Схема возникающих в пластине волн напряжений показана на рис. 8, а, а процесс их развития и взаимодействия иллюстрируется фотографиями картин полос покадровой съемки (рис. 8, б). Момент прихода в исследуемое сечение продольной и поперечной волн отмечен соответственно индексами L и T на щелевой развертке оптических явлений (рис. 8, в).

Приведенные выше фотографии картин полос получены для нагружения, при котором напряжения в волне не вызывают остаточных деформаций в модели, за исключением, конечно, небольшого района вблизи места приложения импульса.

Как уже отмечалось, наиболее перспективной областью применения покрытий является использование их для изучения упруго-пластического поведения моделей.

В качестве примера на рис. 9, а (см. вклейку, стр. 257) приведена картина полос, полученная для кольца, которое в исследуемом сечении нагружается выше динамического предела текучести.

Покрытие имеет тот же состав, который использован при исследовании стержней.

Весьма своеобразен характер развития пластического шарнира в исследуемом нижнем сечении кольца. При инициировании заряда (0.2 г) в верхней части кольца возникают две волны напряжения, которые распространяются по кольцу навстречу друг другу. Напряжения в каждой из волн ниже предела текучести и потому не вызывают остаточных деформаций. Однако в нижнем сечении происходит сложение волн, что приводит к возникновению пластических деформаций. Картина полос, соответствующая остаточным деформациям и полученная для статического состояния модели, приведена на рис. 9, б.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Салищев, УНФ, VI, 155, 1959.
2. Н. А. Стрельчук, Ф. Ф. Губин, Г. Д. Хесин, И. Х. Костин, XIX научно-техн. конф. МИСИ (тезисы), 1960.
3. Л. К. Малышев, Строительная механика и расчет сооружений, 2, 1961.
4. Л. К. Малышев, А. П. Федоров, Н. А. Флерова, Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 183, 1962.
5. D. N. Senior, Engn., 186, 4824, 248, 1958.
6. Г. Кольский, Волны напряжения в твердых телах. ИЛ, 1955.
7. В. Б. Ликоренко, УНФ, VI, 131, 1959.

Б. А. АРЛОВ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФОТОРЕГИСТРАЦИИ В ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

В настоящее время фотосъемка оказывается недостаточным средством регистрирования в интерференционных исследованиях, так как изучение развития и протекания некоторых процессов требует определения смещений интерференционных полос во времени.

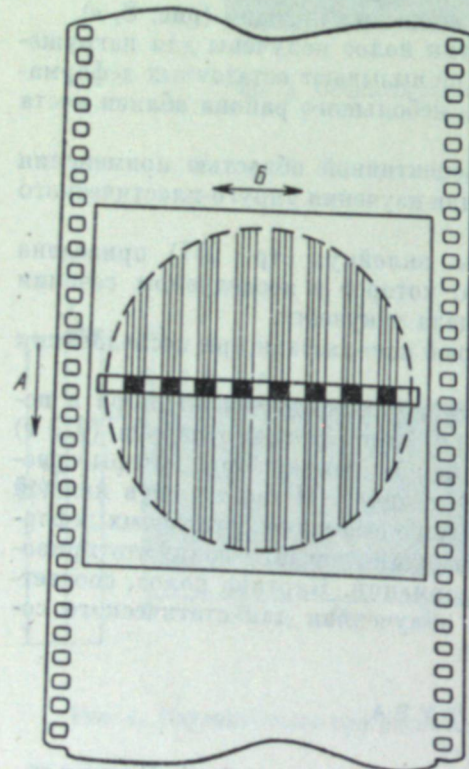


Рис. 1. Схема фоторегистрации интерференционной картины.

А — направление движения пленки; Б — направление смещений интерференционных полос.

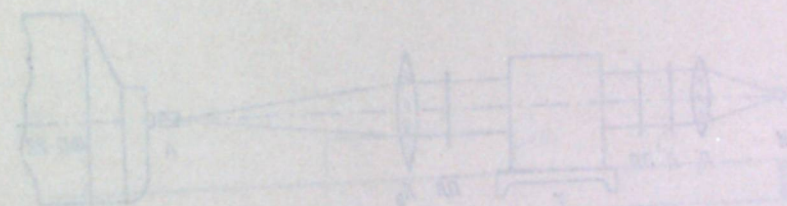
Наиболее полно задача определения смещений интерференционных полос во времени решается с применением метода фоторегистрации. При использовании этого метода мы имеем возможность непрерывного наблюдения за смещением полос в сечении поперек всего поля зрения прибора. Направления смещений явно видны на полученной интерферограмме, а пределы измерений лимитируются только монохроматичностью используемого света. Особенный интерес представляет фоторегистрация, проводимая совместно с кадровой киносъемкой, так как в этом случае мы получаем исчерпывающие сведения об исследуемом с помощью интерферометра явлении.

Можно сказать, что интерференционная картина является идеальным объектом для применения фоторегистрации (рис. 1). Части интерференционных полос, попадающие на расположенную перпендикулярно им щель фоторегистра, при смещениях во время регистрации «пишут» на движущейся пленке точные трассы смещений полос в сечении поля, занятом щелью.

Интересным исследованием с использованием фоторегистрации было выявление вибраций интерференционной картины под влиянием силовых агрегатов, работающих во время проведения измерений интерферометром

и служащих источниками звуковых колебаний и вибраций фундаментов. На рис. 2 (см. вклейку, стр. 257) представлен участок одной из снятых разверток интерференционной картины.

Съемка производилась киносъемочной камерой СКС-2, несколько переконструированной для обеспечения непрерывности движения пленки со скоростью около 1 м/сек. Щелью служил кусок медной фольги с прорезью, помещенный в кадровое окно камеры.



И. П. ДОБРОВОЛЬСКИЙ

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ В ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ

Некоторые прозрачные материалы под действием нагрузки приобретают оптическую анизотропию, обнаруживаемую в поляризованном свете. Это является физической основой поляризационно-оптического метода исследования напряжений. Метод фотоупругости находит применение в решении как статических, так и динамических задач теории упругости.

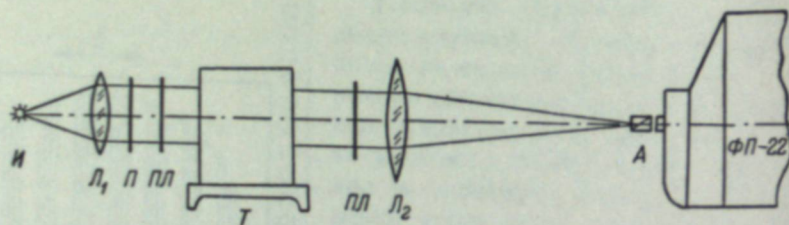


Рис. 1. Схема установки.

И — источник света; Л₁, Л₂ — линзы; П — поляризатор; ПЛ — пластинки четверть волн; А — анализатор; Т — термостат с загрузочным устройством.

Большое значение в разработке метода динамической фотоупругости сыграло развитие скоростной фотографии и кинематографии в качестве основного средства фиксации интерференционных картин напряжений. На кафедре теории упругости Механико-математического факультета МГУ для изучения распространения волн напряжений использовалась скоростная киносъемочная камера ФП-22. Схема установки приведена на рис. 1. В качестве источника света И применялись ртутные лампы СВДШ-250-3 и СВДШ-500-3, работавшие на постоянном токе в форсированном режиме. При съемках на цветную пленку источником света служила электрическая угольная дуга с силой тока около 10 а. Поляризатор П и пластинки ПЛ были изготовлены из поляроидных пленок; анализатор А представлял собой призму Николя, помещенную непосредственно перед входным отверстием объектива в пучке света, собираемого линзой Л₂. Эта линза с фокусным расстоянием 1.6 м находится в комплекте камеры.

Объект съемки располагается на участке параллельного пучка света на загрузочном устройстве в термостате Т. Термостат имел иллюминаторы для сквозного просвечивания и позволял производить нагружение модели при температурах от комнатной до 140° С. Размер поля изображе-

К ст. А. П. Федорова,
стр. 252.

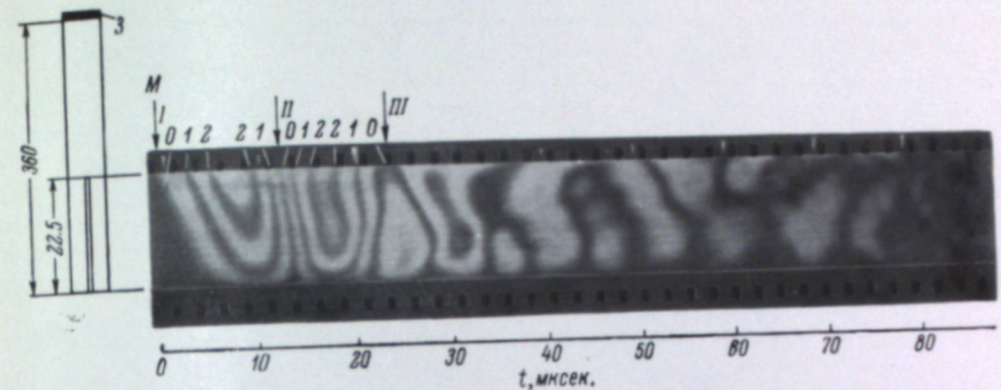


Рис. 5. Картина полос при расположении продольной щели около свободного конца стержня.

М — момент появления первичной волны; 3 — заряд.

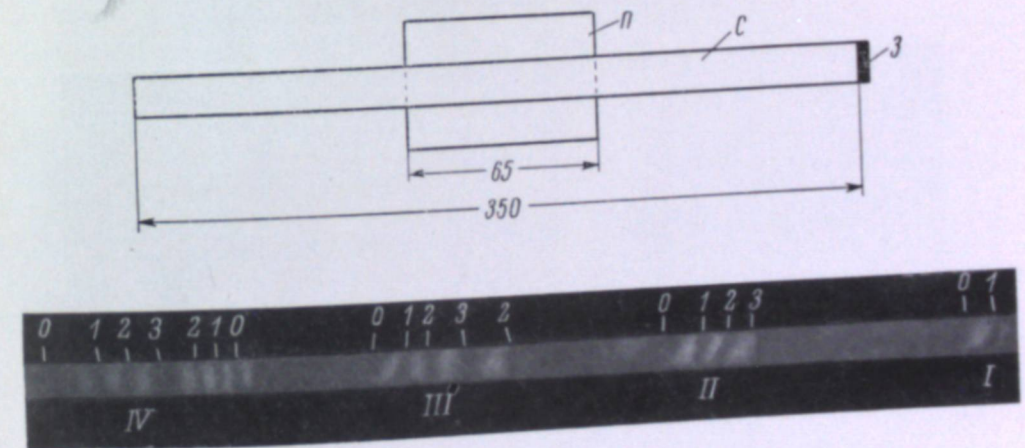


Рис. 6. Фотографии картин полос при работе СФР в варианте «луны времени».

С — стержень; П — поле кадра; 3 — заряд.

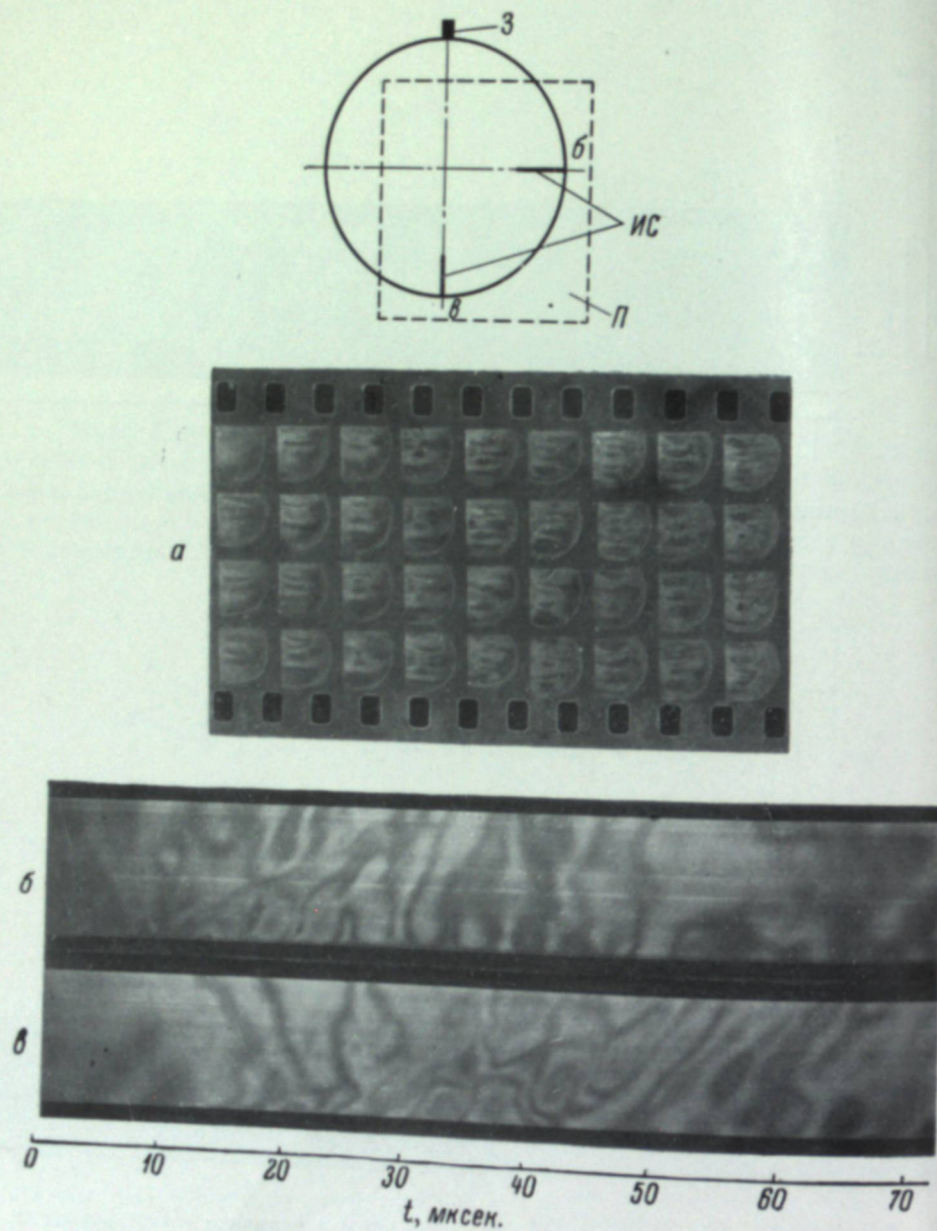


Рис. 7. Фотографии картин полос для диска.
З — заряд; ИС — исследуемые сечения; П — поле кадра.

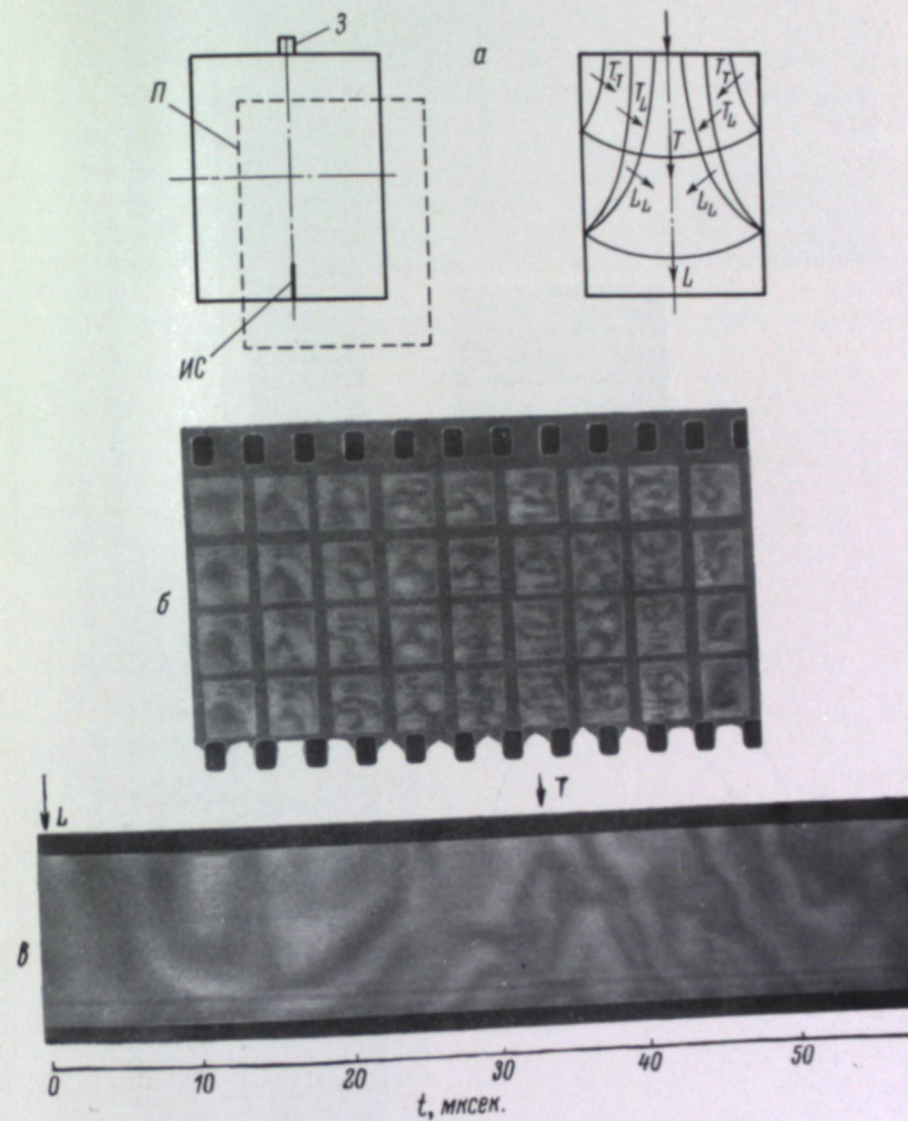


Рис. 8. Прямоугольная пластина.

а — схема волн напряжений в пластинке; б — картина полос при работе СФР в варианте «луны времени»; в — картина полос при работе СФР в варианте фоторегистратора. З — заряд; ИС — исследуемое сечение; П — поле кадра; L — продольные волны; T — поперечные волны.

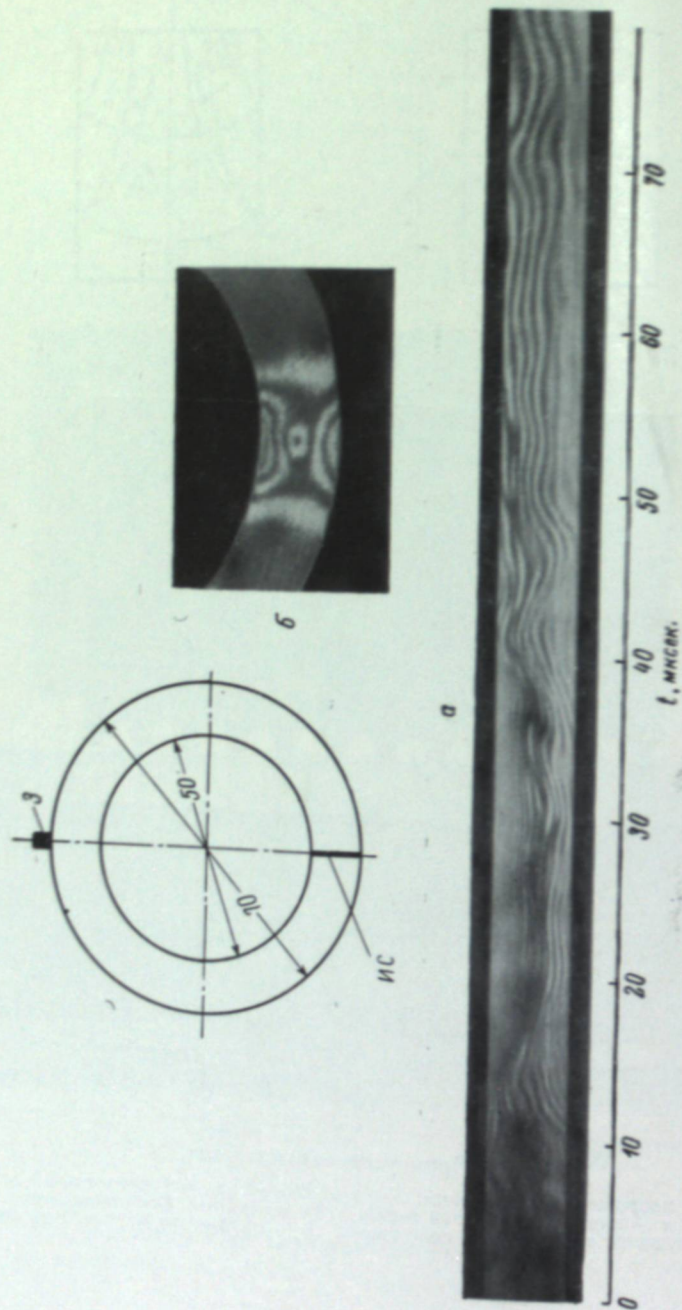


Рис. 9. Картины полей колебаний при нагружении выше динамического предела текучести.
3 — заряд; ИС — исследуемое сечение.

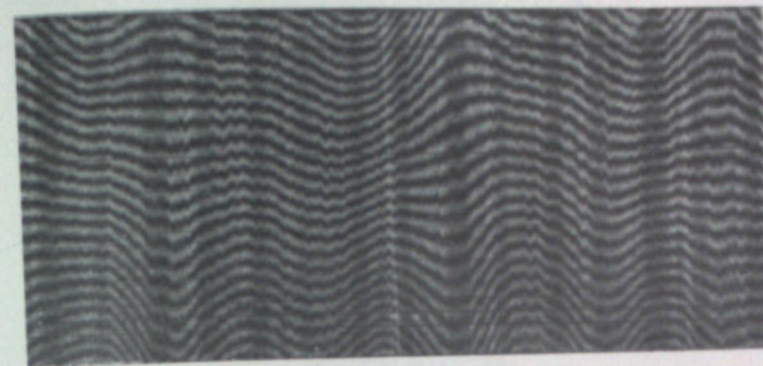


Рис. 2. Типичные колебания интерференционных полос под влиянием внешних вибраций.

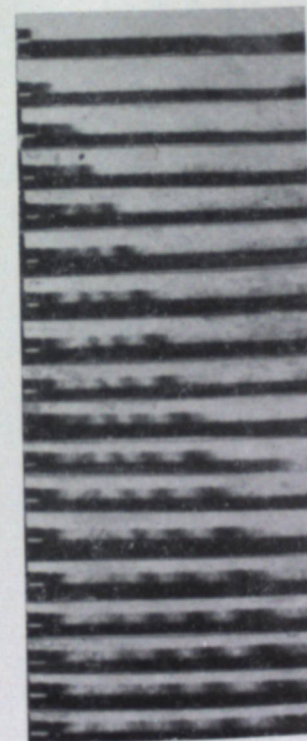


Рис. 2. Волна напряжений в стержне из стирол-алкидной смолы.
Слева — бокс грузозачного устройства.



Рис. 3. Кинограмма распространения изохром импульса напряжения в продольном сечении $2/3L$, полученная при работе камеры в варианте фоторегистратора.

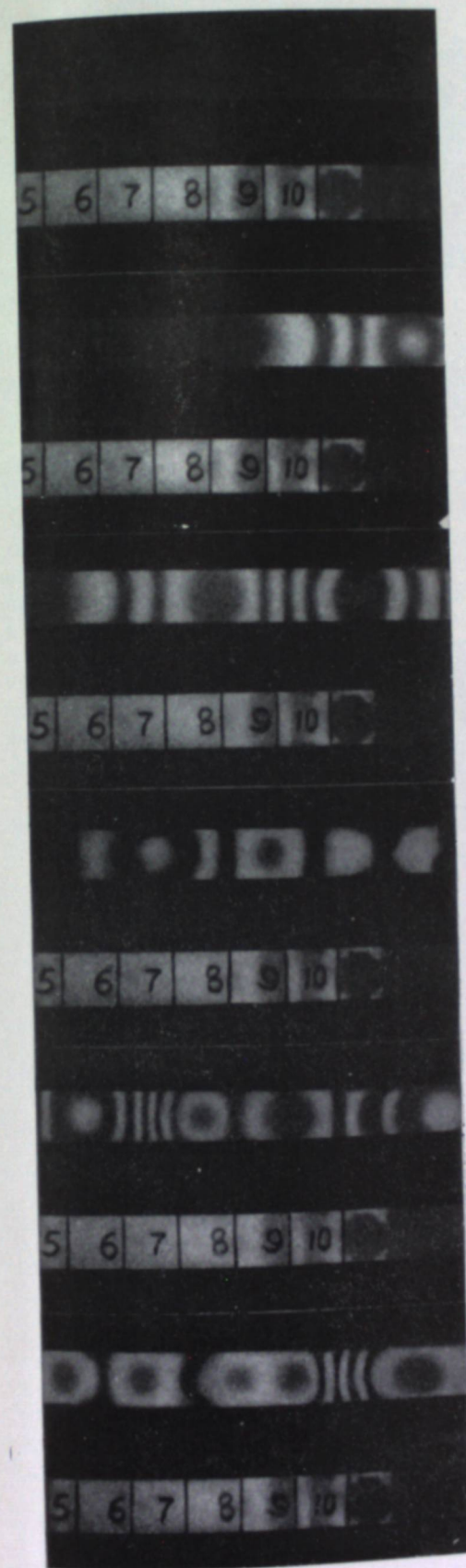
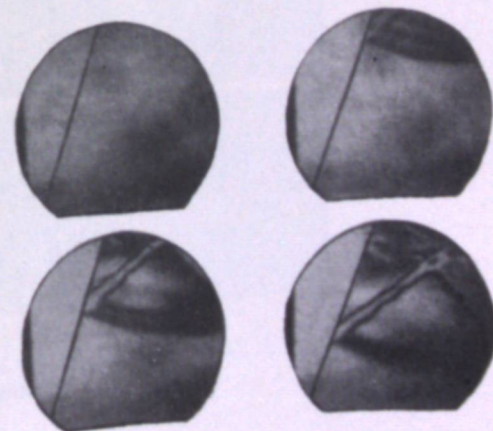


Рис. 4. Фотографии распространения импульса напряжения, полученные при работе камеры в варианте «слупы времени».

Рис. 7. Фотографии распространения волн напряжений в пластине.



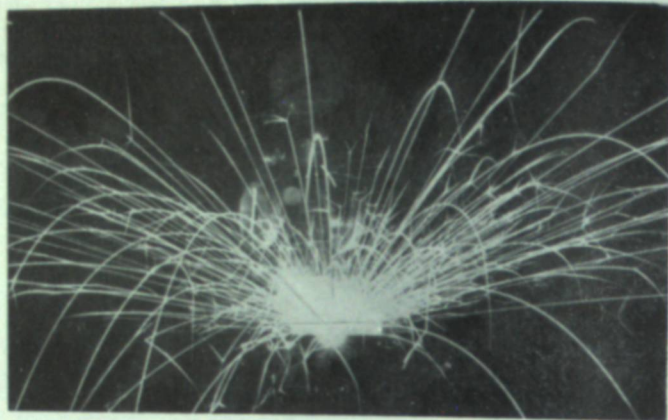


Рис. 1. Вылет частиц из стального электрода. Снимок сделан неподвижной камерой.

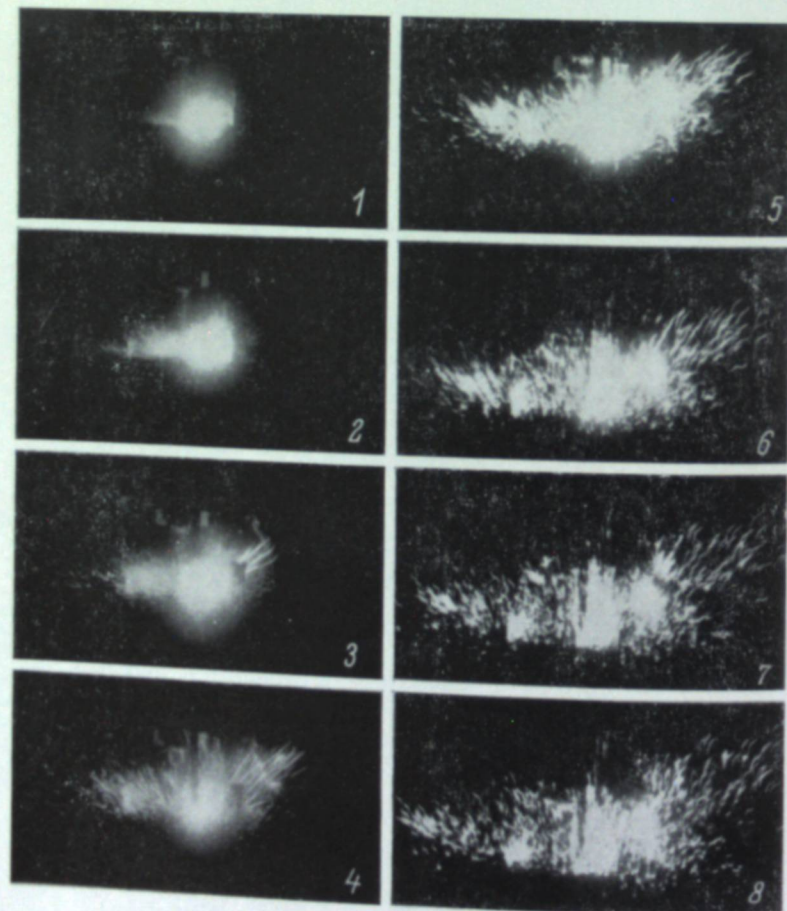


Рис. 2. Первые 8 кадров скоростной съемки вылета частиц из стального электрода.

ния на объекте $9.5 \times 12 \text{ см}^2$, масштаб изображения $1 : 25$, длина установки от источника света до входного отверстия объектива камеры — 3 м.

Съемка производилась на черно-белых пленках типов МЗ, А₂, Д₂ и цветных пленках. Заметим, что соответствующей установкой поляризов (скрещенное или параллельное положение) можно производить съемку на темном или светлом фоне. При этом интерференционные картины напряжений получают дополнительные друг к другу по цвету.

Изучение снятых процессов производилось просмотром пленок через кинопроектор и по кинограммам, отпечатанным с увеличением в $8 \div 10$ раз. В этом случае единичное измерение по кинограмме в зависимости от контрастности измеряемого участка изображения выполнялось с точностью порядка $0.2 \div 0.5 \text{ мм}$, что на натуре составляет $0.6 \div 1.5 \text{ мм}$.

На рис. 2 (см. вклейку, стр. 257) приведена кинограмма распространения волны напряжений в стержне из стиролалкидной смолы при температуре 120°С . Частота съемки 100 000 кадров/сек., сечение стержня $5 \times 5 \text{ мм}^2$.

Исследования производились на образцах из стиролалкидной и эпоксидной смол при комнатной и повышенной температурах ($120\text{--}140^\circ \text{С}$). При высокой температуре материал образцов размягчался и модуль продольной упругости падал до $30\,000\text{--}40\,000 \text{ кг/см}^2$, т. е. в $200 \div 300$ раз. Если допустить, как указывает элементарная теория распространения волн напряжений в длинных стержнях, что скорость волны пропорциональна корню квадратному из модуля упругости, то уменьшение модуля в $200 \div 300$ раз вызывает уменьшение скорости распространения волны в $14 \div 17$ раз. В действительности скорость волны уменьшилась лишь в $3 \div 6$ раз, причем скорость волны в стержнях при повышенной температуре была переменной, падая в 2.7 раза (от 710 до 260 м/сек.) на участке около 20 диаметров от ударяемого конца. Описанные явления можно объяснить тем, что элементарная теория волн напряжений не учитывает влияния коэффициента Пуассона, который при $120\text{--}140^\circ \text{С}$ близок к 0.5.

Л. К. МАЛЫШЕВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКОРОСТНОГО ФОТОРЕГИСТРАТОРА СФР ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ФОТОУПРУГОСТИ

В настоящее время уделяется значительное внимание вопросу применения метода фотоупругости к исследованию процессов распространения волн напряжений [1—8]. Для фотографической регистрации изохром волн напряжений, распространяющейся в материалах со скоростью звука, удобным является использование скоростного фоторегистратора

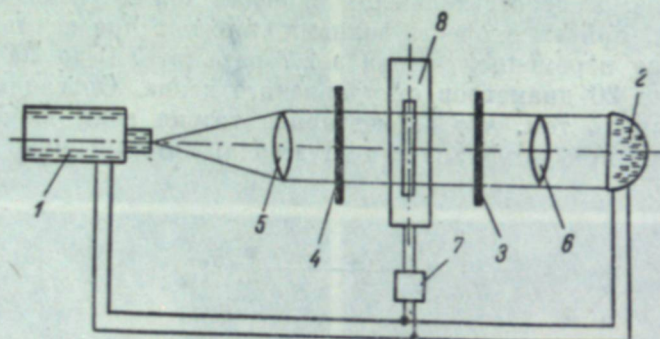


Рис. 1. Принципиальная схема фоторегистрирующей установки.

1 — камера СФР; 2 — осветительное устройство; 3 — поляризатор;
4 — анализатор; 5, 6 — линзы; 7 — импульсное реле задержки;
8 — нагрузочное устройство.

СФР, поскольку указанная кинокамера позволяет получать выдержки до $0.2 \cdot 10^{-6}$ сек.

Принципиальная схема фоторегистрирующей установки приводится на рис. 1. Основными узлами установки являются камера СФР, осветительное устройство и импульсное реле задержки.

Вследствие низкого относительного отверстия камеры СФР (1 : 30.2) и значительных потерь световой энергии в поляризационной части установки в качестве источника света использовалась импульсная лампа ИФК-20 000. При параметрах блока питания лампы $U=12$ кв и $C=40$ мкф оказалось возможным получать монохромные и цветные фотографии при частоте съемки $1\ 350\ 000$ сек.⁻¹. Длительность свечения вспышки импульсной лампы исключала возможность многократного экспонирования кадров.¹ Параллельный пучок света создавался специальным осветительным

¹ Электромагнитный затвор камеры СФР не производит отсечки света при высоких скоростях съемки.

устройством, состоящим из системы линз, переднего и заднего отражателей. Применение указанного осветительного устройства позволило повысить также коэффициент использования источника света. Поляризационная часть установки включала поляроидные фильтры диаметром 300 мм и слюдяные пластины $\lambda/4$.

Синхронизация начала съемки, вспышки лампы и инициирования исследуемого явления осуществляется согласно схеме рис. 1. Синхроимпульс СФР подается одновременно на осветитель и через импульсное реле задержки на нагрузочное устройство. Диапазон работы реле ($1 \div 800 \times 10^{-6}$ сек.) позволяет синхронизировать явление с максимальной интенсивностью светового излучения лампы и производить фотографирование в частях моделей, удаленных от места нагружения. Включение реле в цепь

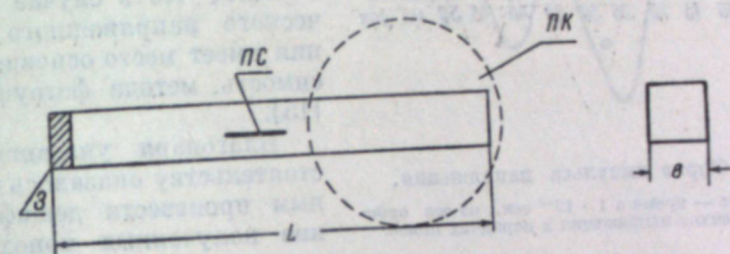


Рис. 2. Схематическое изображение исследуемого стержня.
ПС — продольное сечение; ПК — поле кадра; 3 — заряд.

поджига лампы позволяет производить фотографирование поздних фаз процесса.

На данной установке были проведены исследования по распространению волн напряжений в свободно подвешенных стержнях квадратного поперечного сечения и пластинах при действии на них импульсной нагрузки.

Для возможности выравнивания неоднородностей в распространяющемся импульсе напряжений, получающихся вследствие приложения импульсной нагрузки, геометрические размеры образца (L и b) должны находиться в определенном соотношении [9—11]. Исходя из этого, размеры стержня были приняты следующими: $L=300$ мм, $b=10$ мм (рис. 2). Стержни изготавливались из листового органического стекла толщиной 10 мм. Нагружение осуществлялось детонацией у торца стержня плоского заряда азида свинца.

На рис. 3 (см. вклейку, стр. 257) представлена фотография распространения изохром импульса напряжения в сечении стержня $2/3 L$ при работе камеры в режиме фоторегистратора. Ширина исследуемого продольного сечения составляет 0.06 мм; вес заряда 0.1 г. В этом случае изохромы импульса напряжения фиксируются в виде наклонных линий, поскольку направления распространения волны и разветвки взаимно перпендикулярны. По углу наклона изохром можно определить скорость распространения импульса напряжения, которая составляет 2150 м/сек.

На рис. 4 (см. вклейку, стр. 257) приводятся фотографии, полученные при работе камеры в варианте «лупы времени». Интервал между снимками $t=17.6 \cdot 10^{-6}$ сек.

В поле кадра входила область, отмеченная на рис. 2. Снимки 1—3 соответствуют подходу импульса к свободному концу стержня; снимки 4—6 моменту его отражения и формирования отраженной волны.

Из рассмотрения фотографий рис. 3 и 4 следует, что импульс напряжения состоит из ряда изохром. Основная часть волны является почти плоской с высоким градиентом напряжений. Некоторая неравномерность рас-

пределения изохром по поперечному сечению частично объясняется влиянием продольных граней стержня, а также спецификой формы заряда [12—

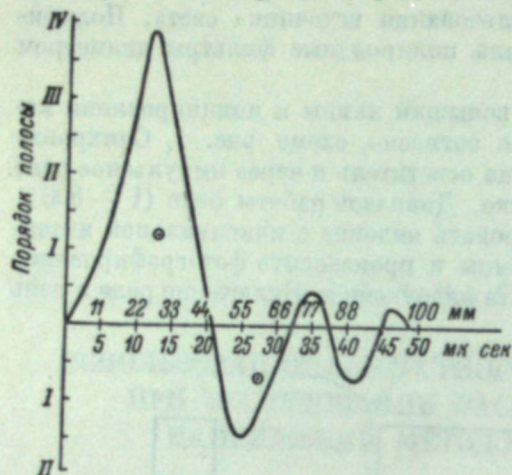


Рис. 5. Форма импульса напряжения.

По оси абсцисс — время в $1 \cdot 10^{-6}$ сек.; по оси ординат — величина напряжения в порядках полос.

роить форму импульса, которая приводится на рис. 5.

Для осуществления опыта по исследованию распространения волн напряжений в пластине была изготовлена модель из листового органического стекла толщиной 3 мм (рис. 6). Нагружение осуществлялось цилиндрическим зарядом азида свинца весом 3.5 г.

На рис. 7 (см. вклейку, стр. 256) представлены фотографии, полученные при параллельном положении поляроидов. Интервал между снимками составляет $t = 17.6 \times 10^{-6}$ сек. На снимках четко видны фронты продольной волны P , распространяющейся со скоростью $c_1 = 2470$ м/сек., и поперечной волны T , распространяющейся со скоростью $c_2 = 1410$ м/сек. Кроме указанных прямых волн напряжения, видны также волны напряжения, отраженные от свободной кромки пластины.

В заключение автор считает своей обязанностью принести искреннюю благодарность научному руководителю работы начальнику лаборатории кандидату технических наук Нине Андреевне Флеровой.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Senior, A. Welles, Phil. Mag., 37, 463, 1946.
2. D. Christie, Phil. Mag., 7, 46, 376, 1955.
3. H. Schardin, W. Struth, Glastechn. Ber., 16, 219—227, 1938.
4. M. Frocht, P. Flynn, Journ. of Appl. Mech., 1, 6, 1956.
5. H. Edgerton, F. Barstow, Journ. Americ. Ceramic Soc., 24, 131, 1941.
6. E. Pugh, Journ. of Appl. Physic., 1, 23, 1951.

7. A. Durrigelli, W. Riley, Journ. of Appl. Mech., 24, 1, 1957.
8. А. Салищев, УНФ, VI, 155, 1959.
9. Г. Кольский. Волны напряжения в твердых телах. ИЛ, 1955.
10. R. Davies, Phil. Trans. A., 240, 375, 1948.
11. R. Morse, Journ. Acoust. Amer., 22, 219, 1950.
12. К. Андреев. Термическое разложение взрывчатых веществ. Госэнергоиздат, 1957.
13. J. Roesler, Phil. Mag., 7, 46, 376, 1955.
14. Р. Коул. Подводные взрывы. ИЛ, 1950.
15. Э. Кокер, Л. Файлон. Оптический метод исследования напряжений. ОНТИ, 1936.

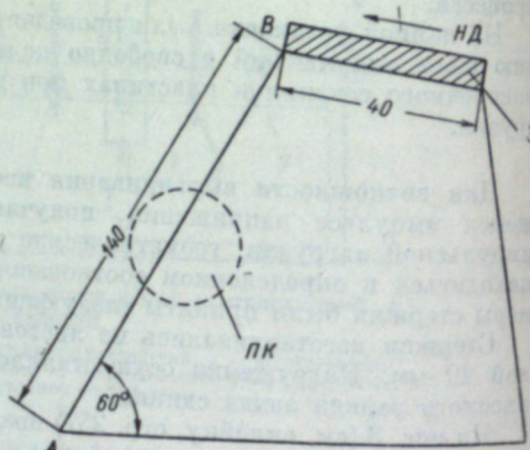


Рис. 6. Схематическое изображение исследуемой пластины.

НД — направление детонации; 3 — заряд; ПК — поле кадра.

А. С. ЗИНГЕРМАН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭРОЗИИ СКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКОЙ

Два основных фактора определяют электрическую эрозию: тепловые процессы в электродах и удаление металла из них.

Тепловые процессы в электродах достаточно хорошо изучены. Однако создание тепловой теории электрической эрозии все же невозможно из-за полного отсутствия сведений о том, когда и каким образом происходит выброс металла из электродов, который существенным образом влияет на тепловые процессы в них. Установлено, что тепло передается электроду через его поверхность, соприкасающуюся с разрядным каналом, температура которого достигает тысяч или десятков тысяч градусов. Если плотность теплового потока из разрядного канала в электрод очень велика, то в небольших зонах электрода может произойти взрывное испарение металла и тогда металл из электрода выбрасывается в виде струй паров. Приближенная тепловая теория такого процесса дана в [1].

Возможен и другой механизм выброса металла. Тепло, передаваемое электроду, нагревает небольшую его зону. Вследствие теплопроводности тепло распространяется в электроде и распределение температуры в нем неравномерное. Часть металла нагревается до температуры плавления и по мере плавления удаляется в жидком состоянии. При таком механизме удаления металла тепловая задача имеет другое решение и величина эрозии также получается иной [1].

Возможно, однако, что удаление металла происходит только в конце разряда. Тогда тепло передается жидкому металлу и распространяется сначала в жидкой, а затем в твердой фазах металла. При этом тепловая задача имеет третье решение и величина эрозии может быть на порядок меньше, чем при первых двух механизмах.

Цель скоростной киносъемки — выяснить механизм удаления металла, который, как видно, сильно влияет на величину эрозии, и получить основные исходные данные, необходимые для разработки полной тепловой теории.

Снимался разряд между плоским и стержневым электродами, между которыми устанавливалось расстояние в 25 мк. Стержневой электрод с полусферическим концом был изготовлен из графита и имел диаметр 4 мм. Плоский электрод размерами 60×45 мм был изготовлен из разных металлов. Разряд происходил в воздухе. В некоторых опытах промежутки между электродами заливались несколькими каплями минерального масла. Предварительными опытами было установлено, что величина эрозии не меняется — помещается ли разрядный промежуток в ванне с маслом или заливается несколькими каплями масла. Было произведено 15 опытов при

различной полярности и положении электродов, при различной мощности от 500 до 7000 Вт и различной длительности разрядов от 5 до 20 мсек.

Была использована киносъемочная камера СКС-1 с частотой съемки 2000 кадров/сек. Выдержка каждого кадра составляла 0.1 мсек., а паузы между кадрами 0.4 мсек. Таким образом можно было получить несколько сот кадров, из которых на 10 ÷ 40 был снят сам процесс разряда. Это было совершенно достаточно не только для получения общей картины, но и для количественных измерений. Съемки производились в темноте на 16-мм пленке типа ДК чувствительностью 360 ед. ГОСТа. Это дало возможность зарегистрировать свечение раскаленных частиц металла, вылетающих из электрода.

На рис. 1 (см. вклейку, стр. 257) приведен обычный фотографический снимок разряда в темноте. Интересно, что в большинстве случаев частица, пролетев некоторое расстояние, распадается на несколько более мелких частиц, дающих пучок треков от места распада. Распавшиеся частицы быстро остывают и их свечение прекращается.

С первых 12 кадров, снятых скоростной киносъемочной камерой, были сделаны отпечатки с разной выдержкой, что дало возможность разглядеть большее число деталей. На отпечатках с малой выдержкой видны вылетающие струи металлов и большая зона с весьма сильным свечением, окружающая разрядный канал. Из-за последнего обстоятельства сам разрядный канал не виден. Летящие частицы видны также только за пределами этой зоны. На отпечатках с большой выдержкой струи не видны, но зато виден разрядный канал и частицы, вылетающие из него.

На рис. 2 и 3 даны отпечатки первых 8 кадров с небольшой выдержкой, на которых снят вылет частиц при одинаковых условиях из стального (рис. 2; см. вклейку, стр. 257) и медного (рис. 3; см. вклейку, стр. 264) электродов.

Анализ полученных снимков дал возможность установить картину выброса металла при электрической эрозии. Через несколько десятков микросекунд после начала разряда в зависимости от его мощности из электрода вылетают струи паров металла. Струи летят с перерывами в разных направлениях в течение нескольких микросекунд. Длительность существования каждой струи невелика.

Через несколько сотен микросекунд после начала разряда из электрода начинают вылетать сначала мелкие, а потом более крупные частицы жидкого металла. Из электродов марки Ст 45 частицы летят непрерывным потоком во все стороны. Их количество следует за кривой, характеризующей мощность импульса в зависимости от времени. Когда мощность невелика и частиц сравнительно немного, удается четко установить, что вылет новых частиц прекращается еще до конца разряда. Исследование вылетевших частиц измерительным микроскопом показало, что все частицы имеют форму правильных шаров. При энергии импульса 22.5 Дж число частиц с диаметром более 10 мк значительно более 2000.

Из медных и алюминиевых электродов частицы вылетают в одну сторону редкими пучками с большими перерывами. Вылет новых частиц прекращается задолго до конца разряда. Частицы имеют большие размеры и более сильное свечение, которое, однако, быстрее прекращается. Остывшие медные частицы имеют форму лепешек с четким микрорельефом поверхности, на которую они падают. Это свидетельствует о том, что вылетающие частицы находятся в жидком состоянии. Медные струи имеют большее сечение, чем стальные. На некоторых кадрах четко видно, что струи распадаются на отдельные капли. Это указывает на то, что медные струи состоят иногда из жидкого металла. Застывшие алюминиевые струи состоят иногда из жидкого металла. Застывшие алюминиевые частицы безформенны, а иногда представляют собой раздавленные шарики.

Из графитовых электродов вылетают только струи паров графита.

Взаимное расположение частиц из кадра в кадр сохраняется. Это дало возможность надежно фиксировать положение отдельной частицы и вычислить ее скорость. Измерения показали, что при разряде в воздухе первая группа частиц вылетает со скоростью 60—80 м/сек. Частицы, вылетающие через 1.5—2 мсек. после начала разряда, имеют скорость в 4 раза меньшую, а скорость частиц, вылетающих через 2—2.5 мсек., уже в 8 раз меньше. В течение первых 2—2.5 мсек. скорость частиц сохраняется, затем она постепенно падает. При разряде в масле скорость значительно меньше.

Алюминиевые частицы иногда застревают между электродами и закорачивают их. Разряд прекращается. Проходящим током такие частицы иногда расплавляются и разряд снова загорается.

Полученные данные дают возможность в значительной степени уточнить тепловую теорию электрической эрозии.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Зингерман. Тепловые теории электрической эрозии, Изв. вузов, Электро-механика, 1960.

К ст. А. А. Миловидова и др.,
стр. 266.



Рис. 2. Внедрение частицы абразива в инструмент и ее разрушение.

К ст. А. С. Зингермана
к стр. 263.

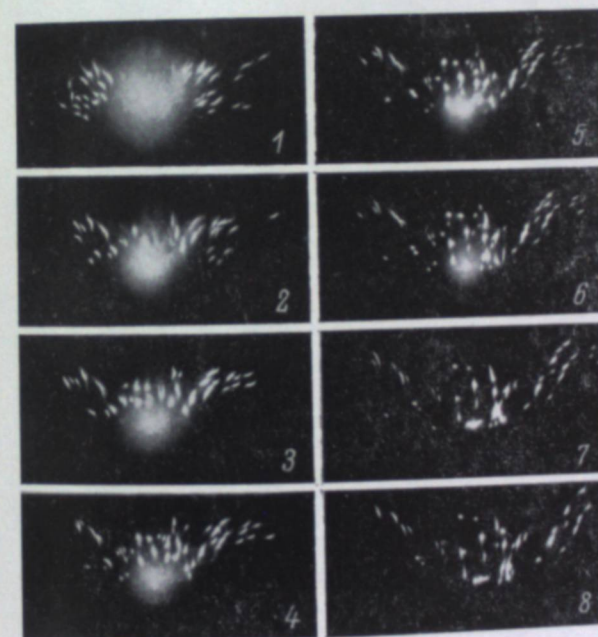


Рис. 3. Первые 8 кадров скоростной съемки вылета частиц из медного электрода.

К ст. А. А. Миловидова и др.,
стр. 266.

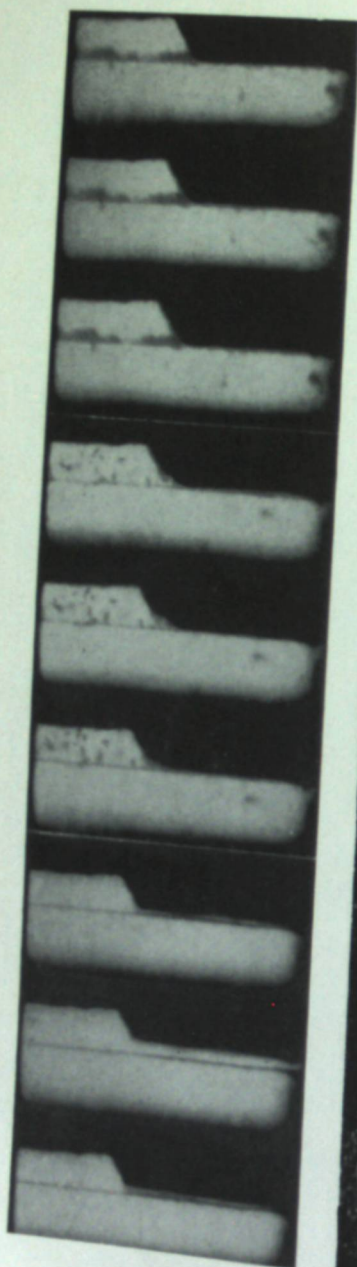


Рис. 3. Разрушение стекла
в зоне контакта инструмен-
та и модели.

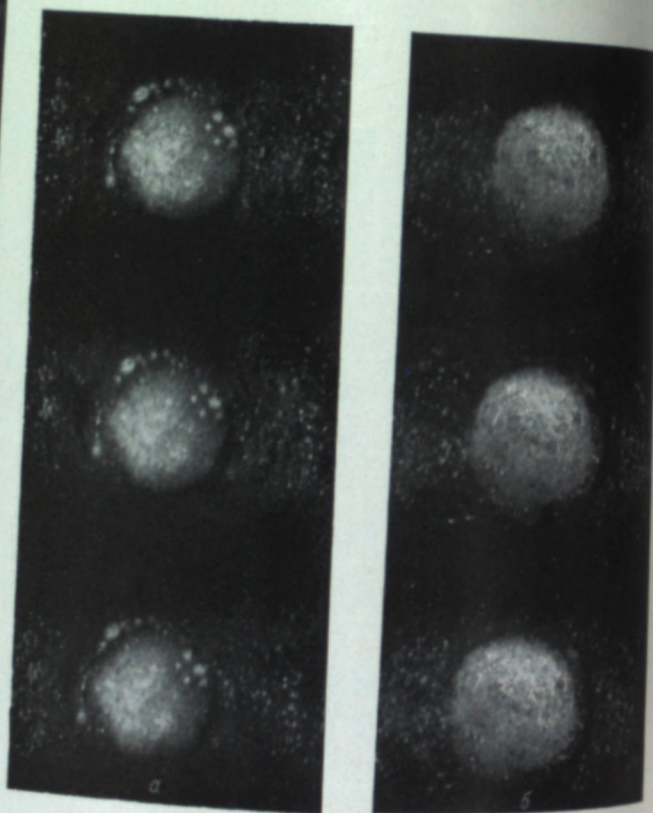


Рис. 5. Обработка стекла цилиндрическим инструментом
при разных режимах. На рис. 5, а виден краевой
характер обработки.

К ст. Э. Т. Джрбашяна,
стр. 269.

Направление движения
←

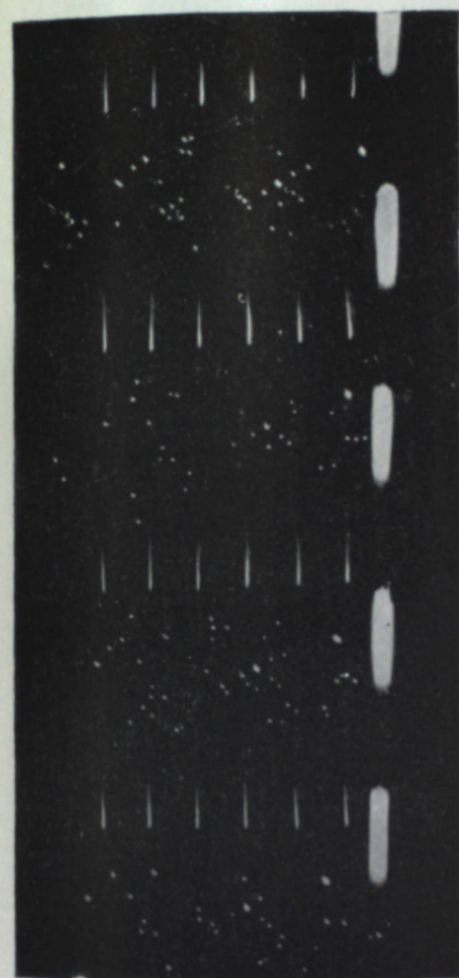


Рис. 2. Образец полученного фильма.

К ст. К. К. Шальнева и др.,
стр. 271.



Рис. 1. Очаги кавитационных разрушений
на крутообтекаемых лопастях радиально-
осевой гидротурбины.



Рис. 4. Участок кинофильма, снятого камерой ССКС-1, $\lambda=2.5$, $U_0=23$ мксек.⁻¹.

А. А. МИЛОВИДОВ, В. Г. АВЕРЬЯНОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОМ¹

Цель данного исследования — выяснение физической природы разрушения твердых хрупких материалов ультразвуковыми колебаниями. С помощью высокочастотной макрокиносъемки требовалось рассмотреть: 1) механизм передачи энергии от вибратора к абразиву; 2) общую картину поведения абразивных частиц в ультразвуковом поле; 3) процесс разрушения модели.

Первый вариант съемки производился по схеме I, изображенной на рис. 1, где *a* — обрабатываемая модель (стекло); *b* — инструмент (лезвие из стали 45 толщиной 0.1 мм), колеблющийся с ультразвуковой частотой; *c* — капля жидкости (вода, глицерин, масло) с абразивом карбид бора или «сухой» абразив; *m* — источник света; *n* — блок из конденсора и теплофильтра; *O* — объектив кинокамеры. В большинстве экспериментов с обеих сторон обрабатываемого стекла укреплялись боковые стекла *e* толщиной 0.1 мм, которые удерживали абразивную жидкость или «сухой» абразив в зоне обработки. Постановка экспериментов без абразивной жидкости была вызвана тем, что возникающая кавитация абразивной жидкости мешала наблюдению за поведением абразивных частиц в ультразвуковом поле. Применялся карбид бора №№ 100 и 200 (размер зерен 100 и 55 мк соответственно). Частота колебаний инструмента в экспериментах была 4 и 20 кгц, амплитуда колебаний инструмента $A \cong 30$ и 20 мк соответственно. На торце инструмента был сделан выступ высотой $h=120$ мк, который превышал диаметр наибольших частиц самого крупного абразива карбида бора № 100. Такой профиль инструмента позволял одновременно наблюдать поведение абразива и характер обработки в зоне контакта абразивных частиц с инструментом и моделью и вне контакта.

Съемка проводилась в проходящем свете камерой СКС-1М с восьмигранной призмой на кадр размером 3.8×10.5 мм в масштабе 3.5 : 1.

¹ Подробный анализ результатов съемки изложен в статье П. Е. Дьяченко и В. Г. Аверьяновой «Исследование диспергирования твердых тел при воздействии ультразвука» в XV сб. «Трение и износ в машинах», 1962.

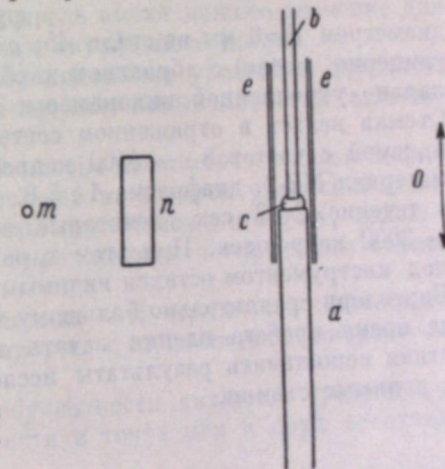


Рис. 1. Схема расположения приборов I.

Частота съемки 9000 кадров/сек. В качестве источника света применялась лампа К-22. Негативный материал МЗ-2, диафрагма 1 : 8.

Обработка стекла начиналась в момент, когда частота съемки достигала 4500—6000 кадров/сек., так что процесс обработки можно было проследить с самого начала.

При данных условиях эксперимента и его съемки удалось получить на экране отчетливое изображение отдельных частиц абразива, проследить

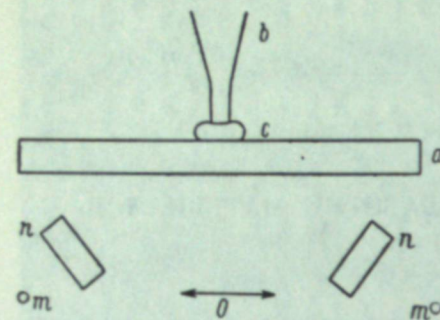


Рис. 4. Схема расположения приборов II.

за их движением, изменением их состояния, а также следить за изменениями в обрабатываемой модели (рис. 2 и 3; см. вклейку, стр. 264). В экспериментах, показанных на этих рисунках, обработка производилась без абразивной жидкости. Для того чтобы наблюдать поведение абразива в жидкости у обрабатываемой поверхности и характер обработки сплошным цилиндрическим инструментом, были проведены съемки экспериментов по схеме, изображенной на рис. 4, где a — горизонтальная стеклянная пластина (обрабатываемая модель); b — инструмент в форме сплошного цилиндра диаметром $d=6$ мм из стали 45; c — капля абразивной жидкости (вода, глицерин, масло) с абразивом карбид бора № 100; o — объектив вертикально укрепленной кинокамеры; m — лампы К-22 с конденсорами n . Съемка велась в отраженном свете камерой СКС-1М с четырехгранной призмой с частотой ~ 4500 кадров/сек. в масштабе 1 : 1. Негативный материал МЗ-2, диафрагма 1 : 5.6. Для наблюдения процесса обработки в течение 2—3 сек. некоторые эксперименты снимались с частотой ~ 2000 кадров/сек. При этом характер распределения частиц абразива под инструментом остался видимым (рис. 5а, б; см. вклейку, стр. 264). Благодаря сравнительно большому времени съемки (1.3—3 сек.) удалось за время пробега пленки начать и прекратить обработку и впоследствии сопоставить результаты исследований обработанной поверхности с данными съемки.

Э. Т. ДЖРБАШЯН

ПРИМЕНЕНИЕ СКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОГО ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ПОТОКА В ОТКРЫТОМ КАНАЛЕ

Измерения характеристик турбулентного двухкомпонентного (вода—взвешенные наносы) потока, а также оценка относительного движения твердых частиц в окружающей среде имеют важное значение для дальнейшего развития теории движения двухфазного потока.

За последние годы получены дифференциальные уравнения движения для отдельных фаз такого потока, но способы замыкания этой системы еще не полностью разработаны.

Для замыкания системы уравнений плоско-равномерного квазистационарного потока малой мутности, состоящей из четырех уравнений с восемью неизвестными, сделаны допущения, при помощи которых, основываясь на результатах эксперимента, определяются четыре недостающие неизвестные.

В Институте энергетики и гидравлики АН Армянской ССР были поставлены соответствующие эксперименты с применением скоростной киносъемки камерой СКС-1.

Основными характеристиками турбулентности являются среднеквадратичные отклонения проекции скорости в точке или в двух соседних точках.

Для измерения пульсационных характеристик использованы разные методы и измерительные приборы: термоанемометры, гидрометрические вертушки разных размеров, трубки Пито и др. Однако необходимо отметить, что ввиду малости измеряемых величин, точность измерительных приборов должна быть очень высокой. Все вышеуказанные приборы в той или иной степени нарушали структуру потока, обладали инерционностью и другими недостатками и потому не удовлетворяли предъявляемым к ним требованиям.

Кинематографический метод измерения указанных характеристик разработан сравнительно недавно и успешно применен Е. М. Минским [1] и Б. А. Фидманом [2] в экспериментах с однородной жидкостью и М. А. Великановым [3] и Н. А. Михайловой [4] — с двухфазным потоком.

Преимуществом метода является, во-первых, его высокая точность и, во-вторых, то, что, не нарушая структуры потока, можно сразу зафиксировать несколько величин. Недостатком метода является сложность обработки полученных материалов.

Эксперименты проводились в большом стеклянном лотке длиной 12 м и шириной 0.5 м, допускающем в широких пределах варьирование уклона.

В указанных экспериментах определялись пульсационные отклонения скоростей от их средних величин как для жидких, так и для твердых частиц. Техника эксперимента заключалась в следующем: в голове лотка в поток подавалась под напором специальная эмульсия, состоящая из смеси вазелинового масла и хлорбензола, которая после поступления в поток превращалась в шарики диаметром $2 \div 2.5$ мм. Удельный вес шариков равен удельному весу воды. Шарик помогает фиксировать на пленке жидкую среду.

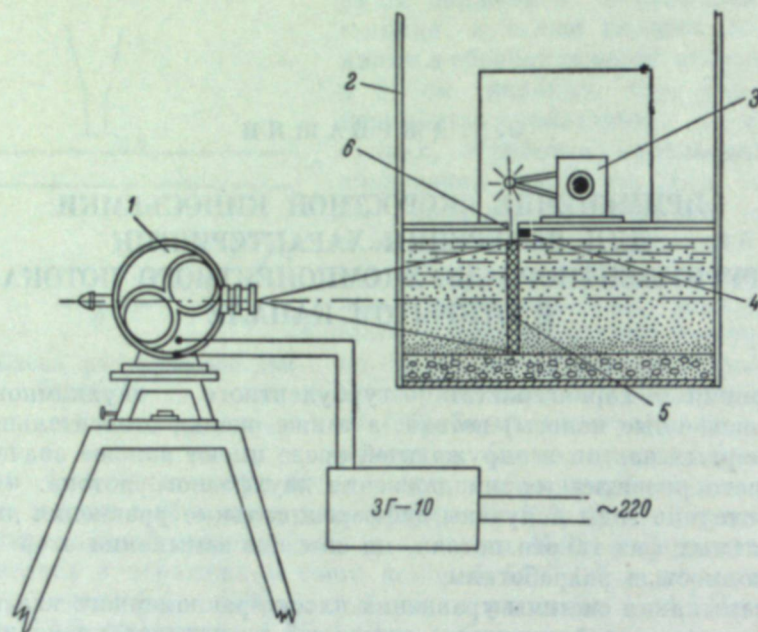


Рис. 1. Схема установки.

1 — скоростная кинокамера СКС-1; 2 — стеклянный лоток; 3 — дуговой прожектор; 4 — приспособление для определения линейного масштаба на кадре; 5 — вертикальный световой нож; 6 — щель для создания «светового ножа».

Для большей контрастности в состав вещества шариков добавлялись белила, что позволяло увеличить контраст. Вещество шариков очень неустойчиво в отношении температурных колебаний и потому, во избежание случайных ошибок, обусловленных температурным влиянием, каждый раз перед подачей шариков в поток их устойчивость тщательно проверялась в циркулирующей в лотке воде.

Проверке подвергалась также степень влияния на сохранность шариков их нагревания во время кратковременного нахождения на освещенном участке при прохождении перед объективом киносъемочной камеры. С этой целью до опыта шарики в воде оставались в течение 2 мин. под воздействием светового луча.

В качестве твердых частиц применялся белый песок вулканического происхождения с диаметром фракций в $0.5 \div 1.15$ мм и объемным весом 1.05 т/м^3 (в сухом состоянии) и 1.3 т/м^3 (после длительного пребывания в воде). Гидравлическая крупность мокрого песка составляла 3.85 см/сек .

Необходимое количество наносов подавалось в лоток из специального бункера, установленного в голове лотка и обеспечивающего непрерывную равномерную подачу песка по всей ширине лотка.

В заранее выбранном створе сбоку лотка устанавливалась киносъемочная камера СКС-1 (рис. 1).

Для того чтобы исключить влияние пространственного распределения шариков или твердых частиц, создавался плоский параллельный пучок

света — «световой нож» — толщиной 1.0 см и длиной вдоль потока 15 см , пропускаемый через устроенную над потоком щель. По ширине потока щель располагалась на расстоянии 15 см от боковой стенки лотка. Источником света являлся дуговой прожектор мощностью 2000 вт .

Выпущенные в голове лотка эмульсионные шарики или песчинки перемещались потоком во взвешенном состоянии и проходили перед объективом киносъемочной камеры.

«Световой нож» освещал только те частицы, которые попадали в него, поэтому на пленке фиксировались именно эти частицы.

Образец кинопленки в увеличенном виде приведен на рис. 2 (см. вклейку, стр. 265).

Важным условием возможности обработки заснятой кинопленки является наличие линейного масштаба в кадре, для получения которого в плоскости «светового ножа» создавались освещенные вертикальные линии, расположенные на расстоянии 2 см друг от друга (рис. 2).

Параллельно со съемкой траекторий частиц записывалось и время. В съемочной камере для этой цели предусмотрена неоновая лампа, которая должна питаться от сети переменного тока с частотой 50 гц .

Однако во время экспериментов для облегчения обработки опытов и для повышения точности измерений питание неоновой лампы осуществлялось от звукового генератора типа ЗГ-10 с частотой 200 гц , что обеспечивало более четкую фиксацию отметок времени.

Необходимая минимальная частота съемки выбиралась из такого расчета, чтобы можно было без затруднений следить за движением выбранной частицы. Такими частотами при скорости потока 1.0 м/сек оказались $500 \div 600 \text{ кадров/сек}$.

Указанным путем получены три фильма: один — для чистой воды с подачей в голову лотка эмульсионных шариков и два — для двухфазного потока при разных средних мутностях. При этих опытах фиксировались только твердые частицы.

Полученные фильмы обрабатывались на установке «Микрофот», предназначенной для просмотра микрофильмов. На экран проецировался первый исходный кадр пленки. На том же экране фиксировались имеющиеся на кадрах реперы, обозначающие дно, и

4 масштабные точки, а также положение которых изучалось. Последовательное рассмотрение кадров позволяет следить за перемещением фиксированной частицы, а следовательно, проследить траекторию ее движения.

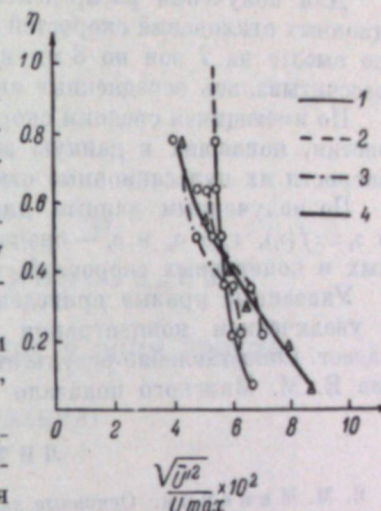


Рис. 3. График зависимости $\sigma_n = f(\eta)$, построенный по результатам киносъемок.

1 — чистая вода; 2 — поток с наносами $\delta_{cp} = 0.6 \times 10^{-2}$; 3 — поток с наносами $\delta_{cp} = 10^{-2}$; 4 — опыты Минского.

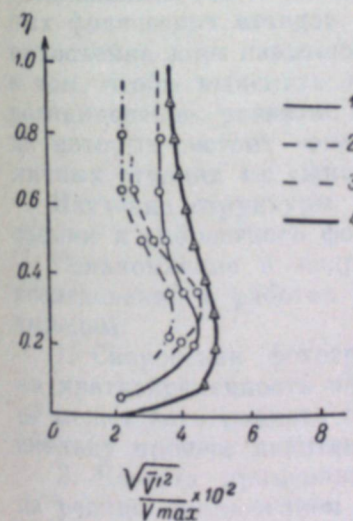


Рис. 4. График зависимости $\sigma_n = f(\eta)$, построенный по результатам киносъемок.

Условные обозначения те же, что на рис. 3.

екторию ее движения. По данным перемещения и отметкам времени определялись скорости частиц при движении по данной траектории.

Для получения распределения продольных и вертикальных пульсационных отклонений скоростей по глубине потока последняя разбивалась по высоте на 7 зон по 8 мм каждая. Для промежутка времени 3.5 сек. рассчитывались осредненные скорости для каждой зоны отдельно.

По имеющимся средним скоростям и мгновенным значениям скоростей частиц, попавших в данную зону, определялись для обеих компонент скорости их пульсационные отклонения от средней величины.

По полученным данным для 3 фильмов построены кривые $\sigma_u = f(\eta)$ и $\sigma_v = f(\eta)$, где σ_u и σ_v — среднеквадратичные отклонения для продольных и поперечных скоростей; η — относительная глубина потока.

Указанные кривые приведены на рис. 3 и 4. Они показывают, что с увеличением концентрации наносов интенсивность турбулентности падает. Сопоставление результатов экспериментов с данными экспериментов Е. М. Минского показало удовлетворительное совпадение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. М. Минский. Основные характеристики турбулентного потока в длинных руслах, Тр. ЦАГИ, 625, 1947.
2. Б. А. Фидман. Применение высокочастотной киносъемки и исследование поля скоростей турбулентного потока, Изв. АН СССР, сер. географ. и геофиз., № 12, 2, 1948.
3. М. А. Великанов. Русловой процесс. М., 1959.
4. Н. А. Михайлова. О структуре турбулентного потока при наличии взвешенных наносов. Метеорология и гидрология, 7, 1953.

К. К. ШАЛЬНЕВ, А. А. МИЛОВИДОВ

СТРУКТУРА ЗОНЫ КАВИТАЦИИ В ЗОНЕ ЭРОЗИИ

(МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ)

Введение

Явление кавитации в жидкостях имеет своим следствием преждевременный износ гидромашин, гидросооружений и аппаратов от кавитационной эрозии. Систематические обследования случаев эрозии в практике [1] и изучение кавитации в лабораториях приводят к заключению, что максимальной интенсивностью эрозии обладают те кавитации, которые возникают в срывных течениях за круто обтекаемыми телами или на поверхностях большой кривизны (рис. 1; см. вклейку, стр. 265) [2]. Но более подробные сведения о механизме кавитационного разрушения требуют специальных, тонко поставленных исследований с применением современных физических методов. Одним из таких методов является скоростная киносъемка зоны кавитации в зоне эрозии. Задача таких съемок состоит в том, чтобы выяснить кинематическую структуру зоны кавитации — возникновение, развитие и исчезновение отдельных каверн и пузырьков, из которых состоит зона кавитации, их размеры и движение на различных стадиях их «жизни».

Изучение структуры зоны кавитации с помощью скоростной киносъемки и скоростного фотографирования предпринималось и ранее.

Ознакомление с подробными описаниями методики и результатов исследований в работах разных авторов [3—27] приводят к следующим выводам.

1. Скоростная фотография отдельных стадий кавитации, несмотря на кратковременность экспозиции порядка долей мксек., сама по себе не может дать полного представления о структуре зоны кавитации, поскольку процесс кавитации меняется во времени.

2. Частота применявшихся киносъемок повышается. Вместе с тем за редким исключением количество кадров, снимаемых за один прием, или, иначе говоря, продолжительность съемки недостаточна для воспроизведения процесса развития кавитации во времени и при кадровом анализе.

3. Этот недостаток скоростных киносъемочных аппаратов создает трудности в изучении зон так называемых проточных срывных кавитаций, развитие которых в проточной воде происходит с более длительным периодом, чем продолжительность съемки. С другой стороны, для изучения процесса развития отдельных каверн кавитации требуется применение киносъемочных аппаратов с очень короткой экспозицией и высокой частотой киносъемки.

4. В большинстве исследований зона кавитации снималась в одной проекции за исключением работы Кнаппа и Голлендера, которые применили двухпроекционную съемку для изучения «жизни» отдельных пузырьков. Поскольку в практике интенсивная эрозия связывается со срывной проточной кавитацией, то в данной работе исследовался типичный случай такой кавитации за моделью круглого профиля, изучавшийся нами ранее [8—10], но с применением другой аппаратуры.

Методика эксперимента

Описываемые ниже исследования были выполнены в Институте механики АН СССР в гидродинамической кавитационной трубе ГТ-2. Возбудитель кавитации — модель круглого профиля или круглый цилиндр диаметром 6 мм — располагался в рабочей камере гидродинамической трубы сечением 6×25 мм². Оба конца цилиндра заделывались в противоположные плексигласовые стенки рабочей камеры. Тем самым исключалось

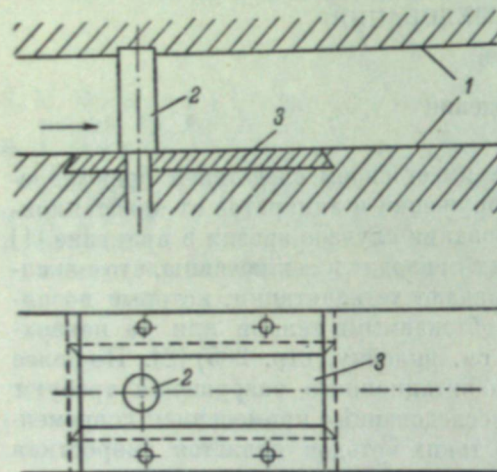


Рис. 2. Схема опыта с кавитационной эрозией под воздействием кавитации модели круглого профиля.

1 — стенки рабочей камеры; 2 — модель;
3 — образец.

один кадр (вид на торец цилиндра и на его боковую поверхность) камерой СКС-1-м с частотой съемки $8 \cdot 10^3$ — $9 \cdot 10^3$ сек.⁻¹. Для освещения использовались лампы К-22 с конденсаторами.

В камере СКС-1 объект снимался на пленку шириной 190 мм и длиной 1406 мм. Размер кадра при частоте $200 \cdot 10^3$ сек.⁻¹ равен 3.6×6 мм². Продолжительность съемки равна 0.02 сек. На пленке размещается около 4500 кадров, которые могут быть использованы при изучении процесса кавитации.

Для кинопроекции результатов съемки отдельные кадры перепечатываются с помощью специального аппарата на позитивную 35-мм пленку.

Известная схема съемки опыта в двух проекциях на один кадр с помощью одного зеркала оказалась в нашем случае непригодной, так как из-за конструктивных особенностей рабочей камеры гидротрубы зеркало невозможно было установить ближе, чем на 70 мм от объекта съемки. При такой схеме съемки объекта с размерами в вертикальной проекции 6×60 мм² и в горизонтальной проекции 25×60 мм² и допустимых значениях диафрагмы невозможно получить глубину резкости порядка 70 мм.

Значительная часть кадра (больше половины) была бы занята бесполезным промежутком между изображениями двух проекций зоны кави-

влияние концов модели на развитие зоны кавитации. На рис. 2-показана схема опыта с эрозией свинцового образца. В этом случае одна плексигласовая стенка, задняя по отношению к наблюдателю, заменялась другой, с гнездом для крепления испытуемого образца.

Скорость потока в рабочей камере могла регулироваться независимо от давления в пределах $v_0 = 6$ — 25 м/сек., длина зоны кавитации $\lambda = l_c/d$ менялась от 0 до 8, т. е. от безкавитационного обтекания до отрывного.

Киносъемка зоны кавитации производилась двумя съемочными камерами: а) в одной проекции (вид на торец цилиндра) камерой СКС-1 конструкции И. И. Крыжановского с частотой $200 \cdot 10^3$ сек.⁻¹ и б) в двух проекциях на

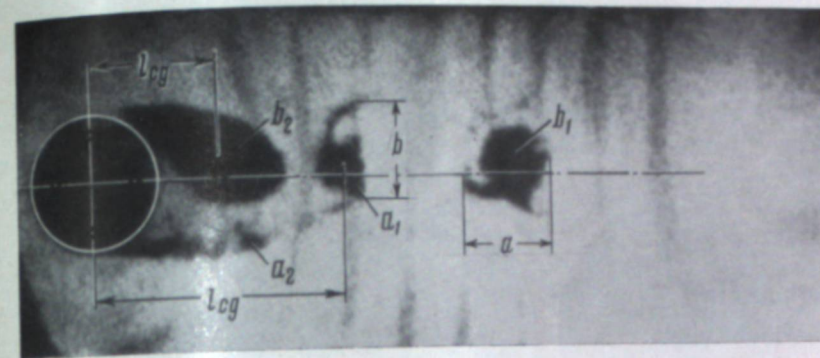


Рис. 5. Отдельный кадр кинофильма, изображенного на рис. 4.

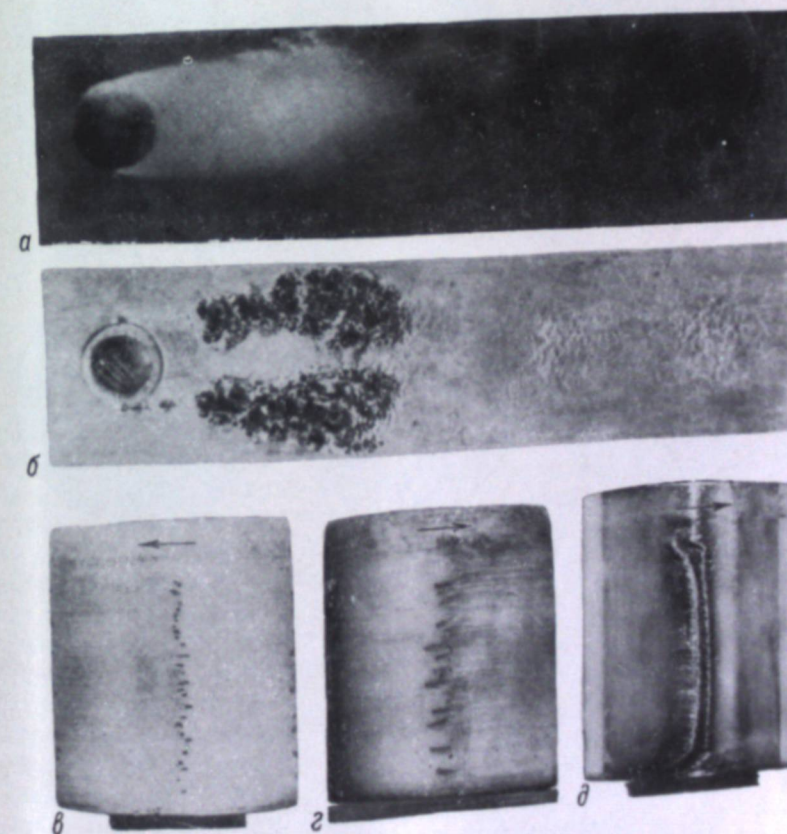


Рис. 6. Фотоснимки при длительной экспозиции.
а — зона кавитации; б — участки эрозии на свинцовом образце; в и г — эрозии на моделях круглого профиля из фторопласта; д — то же из жаропрочной стали.

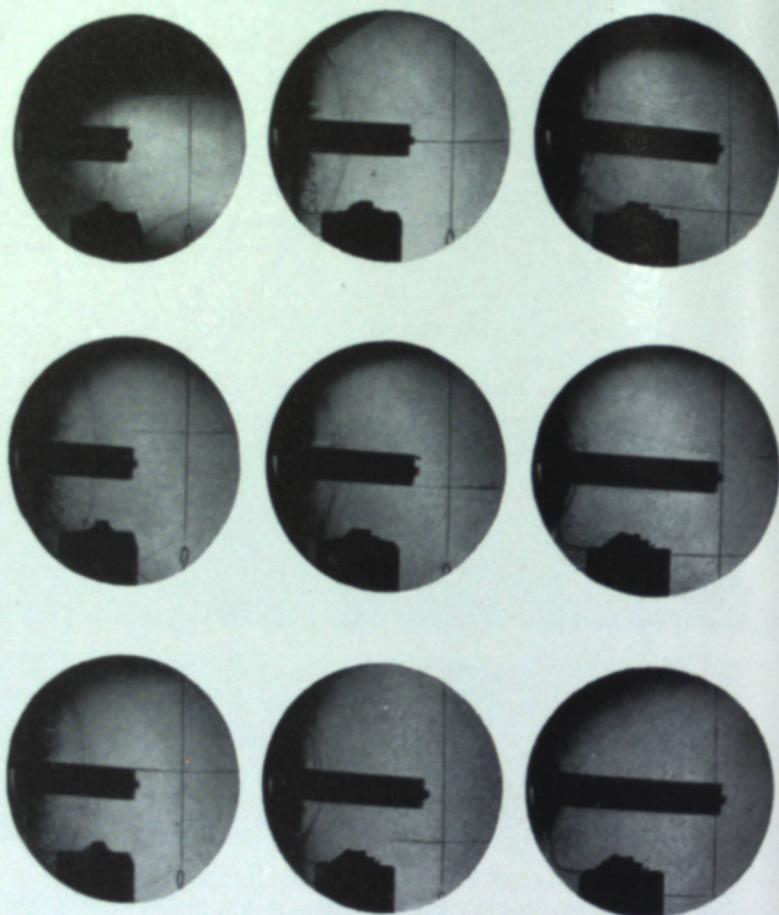


Рис. 2. Серия снимков процесса проникания стержня в медь.

К ст. В. А. Лагунова,
стр. 276.

тации, что привело бы к необходимости уменьшать масштаб съемки. Масштаб изображения каждой проекции был бы разным.

Показанная на рис. 3 схема макросъемки в 2 взаимно перпендикулярных проекциях с помощью трех зеркал обладает следующими преимуществами.

1. В отличие от съемки в двух проекциях с одним зеркалом рационально используется площадь кадра.
2. Обе проекции зоны кавитации строятся на кадре в одинаковом масштабе, что облегчает работу по дешифровке проявленной пленки.

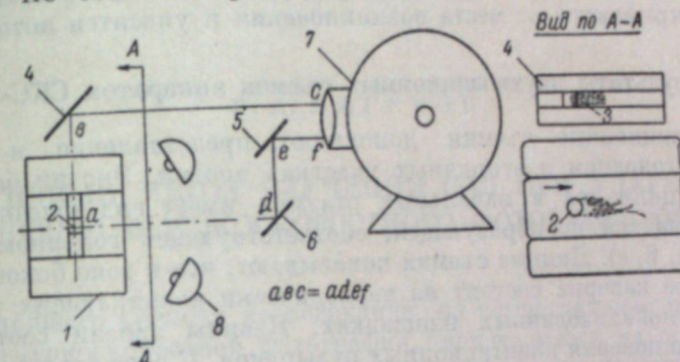


Рис. 3. Схема скоростной киносъемки зоны кавитации в 2 проекциях на один кадр.

1 — стенки рабочей камеры; 2 — модели круглого профиля; 3 — зона кавитации; 4, 5, 6 — зеркала; 7 — камера СКС-1М. asc и $adef$ — передача изображения зоны кавитации в объектив камеры.

3. В отличие от стереоскопических съемок кинопроекция полученных кадров и производство измерений на отдельных снимках не требуют особых приспособлений.

Зеркала 5, 6 устанавливались на различных расстояниях от объектива и не вызывали особых затруднений в размещении осветительных ламп.

Результаты съемок камерой СКС-1

Фотоотпечаток отдельного отрезка пленки, снятой в проходящем свете камерой СКС-1, иллюстрирует, с одной стороны, технику съемок камерой СКС-1, а с другой — развитие зоны кавитации во времени (рис. 4; см. вклейку, стр. 265). Следует различать продольные ряды кадров и поперечные. Последние составляют угол $\alpha \approx 2^\circ$ с направлением продольных рядов. Промежуток времени между кадрами в поперечных рядах равен 5 мксек., в продольных — 75 мксек. На увеличенных фотоотпечатках (рис. 5; см. вклейку, стр. 272) отдельных кадров производились измерения следующих величин: 1) площадей каверн F_c , образующихся с обеих сторон модели в срывном потоке; 2) расстояний центров тяжести площадей каверн от оси модели $l_{сд}$, характеризующих движение каверн вдоль потока; 3) длины каверн a — их максимальную протяженность в направлении течения; ширины каверн b — максимальную протяженность в поперечном направлении к оси потока.

Выше упоминалось, что съемки зоны кавитации производились с таким намерением, чтобы возможно было сопоставление зоны кавитации с зоной эрозии. Если зону кавитации фотографировать с относительно длительной экспозицией, то она представится на снимке в виде парового облака, покрывающего некоторую часть зоны эрозии (рис. 6, а; см. вклейку, стр. 272). Язины эрозии расположены в виде отдельных участков (рис. 6, б). Таких участков несколько: 1) головной участок, расположенный диаметрально под углом 90° к оси потока вблизи боковой поверхности цилиндра; 2) хвостовой участок, тянущийся в виде двух

языков за цилиндром. Эти два участка названы нами первичными очагами эрозии в отличие от вторичных и даже третичных очагов, расположенных за хвостовым участком эрозии вне зоны кавитации, зафиксированной на фотоснимке. Головному участку эрозии на образце соответствует эрозия на боковой поверхности цилиндра (рис. 6, в, г, д).

Другую картину увидим, если будем рассматривать последовательные кадры скоростной съемки (рис. 4, 5). Сплошное облако кавитации состоит из отдельных каверн, изолированных облачков, которые периодически возникают с обеих сторон цилиндра, растут до некоторого максимального размера, отрываются от места возникновения и уносятся потоком.

Результаты двухпозиционных съемок аппаратом СКС-1М

Двухпозиционные съемки дополняют представление о развитии каверн на головном и вторичных участках эрозии. Эрозия боковой поверхности цилиндра в начальных стадиях имеет вид точечных язвин, располагающихся по образующей, соответствующей головному участку эрозии (рис. 6, в). Данные съемки показывают, что в зоне боковой эрозии на цилиндре каверна состоит из периодически возникающих пузырьков на строго локализованных площадках. Язвины эрозии соответствуют месту возникновения кавитационных пузырьков. К зоне вторичных очагов эрозии каверны движутся в виде столбиков между двумя параллельными стенками рабочей камеры. На участке вторичного очага эрозии каверны изменяются двояким образом. В одних случаях они перехватываются потоком в средней части и прижимаются к граничным поверхностям. В других случаях каверны, наоборот, отжимаются от граничных поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Шальнев. Изв. АН СССР, ОН, № 5, 1961.
2. M. Dutoit et M. Monnier, Bull. Assoc. Suisse Electriciens, XXIII année, № 21, 1932.
3. H. Föttinger. Hydraulische Probleme. Berlin, VDI, 1926.
4. H. Mueller. Die Naturwissenschaften, 1928.
5. J. Ackeret. Technische Mechanik und Thermodynamik, B. 1, № 1, 2, 1930.
6. D. Riabouchinsky, Compt. rend., t. 195, 1932.
7. J. C. Hunsaker, Mech. Eng., vol. 57, № 4, 1935.
8. Н. М. Иванов, ЖТФ, 8, 19, 1938.
9. К. К. Шальнев. ЖТФ, 21, 2, 1951.
10. К. К. Шальнев, Изв. АН СССР, ОН, № 5, 1954.
11. M. Kornfeld, L. Suvorov, J. Phys., 8, 3, 1944.
12. R. T. Knapp and A. Hollander. Trans. ASME, vol. 70, 1948.
13. J. W. Daily, Trans. ASME, vol. 71, № 3, 1949.
14. M. Harrison, J. Acoust. Soc. Amer., vol. 24, № 6, 1952.
15. W. D. Chesterman. Proc. Phys. Soc., B. 65, 1952.
16. G. Ziegler. Maschinenbau und Wärmewirtsch., B. 9, № 12, 1954.
17. W. Güth, Acustica, № 4, 1954.
18. E. E. Williams and McNulty, Proc. Sympos. «Cavitation in Hydrodynamics», NPL, London, 1956.
19. J. W. Daily and V. E. Johnson. Proc. Sympos. «Cavitation in Hydrodynamics», NPL, London, 1956.
20. R. T. Knapp. Proc. Sympos. «Cavitation in Hydrodynamics», NPL, London, 1956.
21. A. T. Ellis. Proc. Sympos. «Cavitation in Hydrodynamics», NPL, London, 1956.
22. W. Güth. Proc. Sympos. «Cavitation in Hydrodynamics», NPL, London, 1956.
23. E. Mundry und W. Güth, Acustica, № 4, 1957.
24. E. Meyer und H. Kuttuff. Z. angew. Phys., Bd. 11, № 9, 1958.
25. Л. Д. Розенберг и В. Ф. Казанцев. ДАН СССР, 124, 1, 1959.
26. I. Schmidt, Acustica, № 4, 1959.
27. Ch. F. Naudé, A. T. Ellis. J. Basic Eng. Trans. ASME, ser. D., vol. 83, № 4, 1961.

В. А. ЛАГУНОВ

НОВЫЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ СИЛ ПРИ УДАРЕ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФОТОГРАФИРОВАНИЯ

До настоящего времени исследование сил сопротивления прониканию методами высокоскоростной фотографии производилось на основе обычного кинематического способа, заключающегося, как известно, в нахождении отрицательного ускорения ударяющего тела. Нами разработан новый метод определения мгновенных сил торможения, также основанный на высокоскоростном фотографировании движения заднего торца ударяющего тела, но в котором обработка наблюдений производится с учетом волнового характера распространения в теле упругих возмущений. Новый, волновой метод, обладая повышенной разрешающей способностью во времени, позволяет значительно расширить возможности применения высокоскоростной съемки при изучении взаимодействия быстро летящих тел.

В указанном методе измерителем сил торможения является цилиндрический упругий стержень с произвольной формой головной части. Если экспериментальным путем получена кривая движения заднего торца стержня при его внедрении в деформируемую среду, то, дифференцируя ее по времени, можно определить скорость этого торца как функцию времени $v(t)$. Тогда сопротивление $\sigma(t)$, действующее на ударяющий стержень, можно найти по формуле

$$\sigma(t) = \frac{1}{2} \rho c [v(t - \tau) - v(t + \tau)],$$

где ρc — акустическая жесткость материала стержня; τ — время пробега упругой волны вдоль цилиндрической части стержня; $v(t - \tau)$ и $v(t + \tau)$ — скорости заднего торца в моменты времени $t - \tau$ и $t + \tau$.

Опыты проводились на установке ФТИ АН СССР [1, 2] для высокочастотного фотографирования, которая позволяет получать на неподвижной пленке 13 снимков в темпе $\sim 150\,000$ кадров/сек. Некоторому изменению подверглась лишь схема синхронизации, вызывающий запуск основной как видно, трехэлектродный разрядник, вызывающий запуск основной рабочей схемы, заменен на более устойчивый в работе тиратрон, а схема получения и задержки синхронизирующего импульса переведена на низкое напряжение. Положительный импульс, возникающий при замыкании мишени M , после прохождения линии задержки, которая включается при необходимости съемки поздних стадий внедрения, зажигает тиратрон, вызывая разряд конденсаторов C_1 и C_2 с последующим пробоем разрядного промежутка a_1 .

Интервалы времени между световыми вспышками определялись с помощью фотоумножителя на измерителе времени ИВ-22 с погрешностью ± 0.1 мксек. Для увеличения точности измерения перемещения снималась масштабная сетка, позволяющая исключить возможные искажения мас-

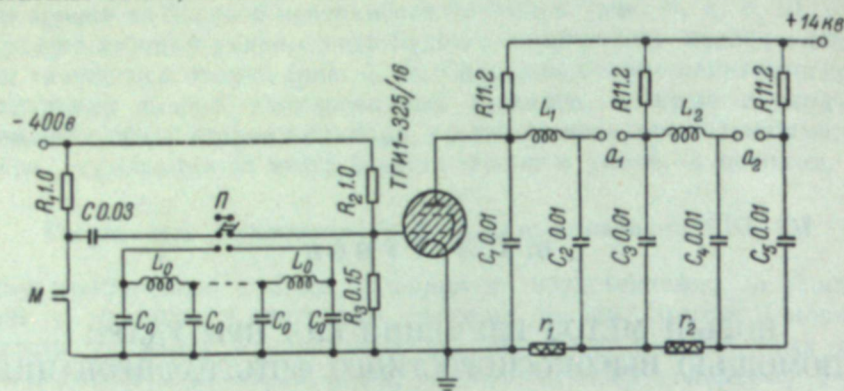


Рис. 1. Схема получения и задержки синхронизирующего импульса.

штаба по полю изображения в различных кадрах, связанные с несовершенством оптической схемы. Это давало возможность измерять перемещения с точностью 0.1—0.2 мм. При такой погрешности измерений волновой метод гарантирует ошибку в определении сил торможения, не превышающую 5—20%, в зависимости от конкретных условий опыта. На рис. 2 (см. вклейку, стр. 273) в качестве примера приведена серия сним-

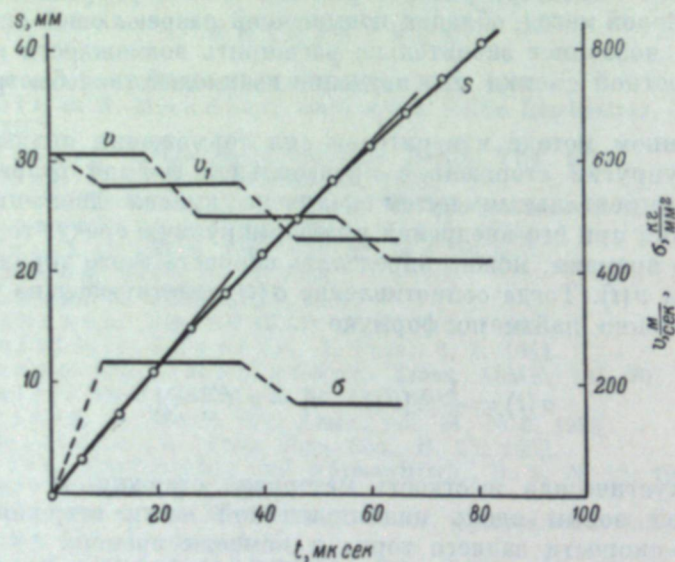


Рис. 3. Экспериментальная кривая «путь—время» и обработка ее по волновому методу.

ков, полученных на установке и иллюстрирующих движение заднего торца стержня при его внедрении в медь. Результаты измерения для стержня с конической головной частью (угол при вершине 90°) при скорости удара $V_0=614$ м/сек. показаны на рис. 3 в виде кривых изменения во времени перемещения s и скорости v заднего торца стержня, а также скорости головной части v_1 и сопротивления σ . Частота съемки 150 000 кадров/сек. не позволяет разрешить изменение скорости внутри интервалов времени длительностью ~ 10 мксек., вследствие чего закон изменения

сопротивления в начальной стадии погружения головной части не мог быть нами определен. Величины сил сопротивления, полученные в опытах, хорошо согласуются с имеющимися в литературе экспериментальными данными [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Салищев, УНФ, VI, 155, 1959.
2. Ф. Ф. Витман и В. А. Степанов, Сб. «Некоторые проблемы прочности твердого тела», посвящ. 80-летию акад. АН УССР Н. Н. Давиденкова. Изд. АН СССР, 1959.

М. Н. НЕГОДАЕВ

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО МОЛОТА МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ

При анализе быстродействующих механизмов, где встречаются нежесткие или полужесткие связи, высокоскоростная киносъемка оказывает существенную услугу. Один из таких случаев — исследование экспери-

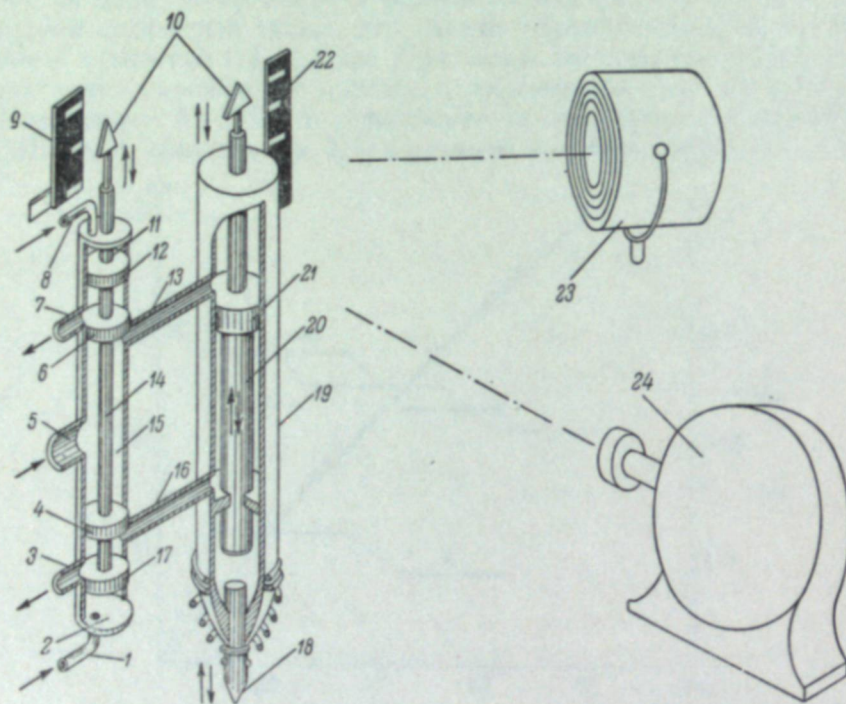


Рис. 1. Схема высокоскоростной киносъемки гидравлического молота.

ментального образца гидравлического молота. В систему этой машины входят гидравлические, иначе говоря, полужесткие связи. Чтобы понять смысл применения высокоскоростной киносъемки в этом эксперименте, необходимо познакомиться с принципом действия гидравлического молота.

В стальном цилиндре 19 (рис. 1) перемещается поршень 21 ударника 20. Ударник бьет по бойку 18, совершая возвратно-поступательное движение. Боек ударяет по материалу, подлежащему разрушению. Возвратно-поступательное движение поршня достигается подачей воды под давлением на одну и другую сторону цилиндра через каналы 13 и 16. Регулятором подачи воды служит золотник 15, бурты которого 4 и 6

попеременно открывают и закрывают каналы 13 и 16 для впуска воды из полости золотника, наполняемой через канал питания 5, и выпуска через каналы 3 и 7. Золотник, в свою очередь, также управляется водой, поступающей через каналы 1 и 8 в полости 2 и 11, в которых работают бурты 12 и 17. Поступление этой воды регулируется краном, управляемым через жесткую связь штоком ударника 20 (кран на рис. 1 не показан).

Принципиальная схема процесса в гидравлическом молоте представлена на рис. 2.

Из схемы видно, что на пути напорной воды, поступающей от источника 2 в исполнительный механизм 4, находится гидравлический рас-

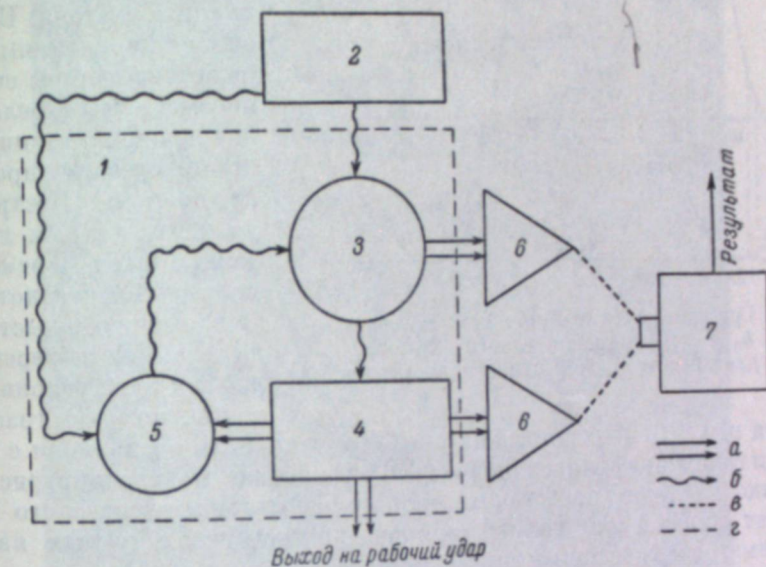


Рис. 2. Схема процесса в гидравлическом молоте, анализируемого высокоскоростной киносъемкой.

1 — гидромолот; 2 — источник гидравлической энергии; 3 — гидравлический распределитель (золотник); 4 — исполнительный (ударный) механизм; 5 — гидравлический распределитель (кран-пилот); 6 — стрелка-индикатор; 7 — кинокамера. а — механическая (жесткая) связь; б — гидравлическая (полужесткая) связь; в — оптическая связь; г — границы системы.

пределитель — золотник 3. Регулирование подачи воды для управления золотником, согласно схеме, осуществляется через обратную связь золотника с исполнительным органом. Причем в цепи обратной связи действует кран 5, связанный с исполнительным механизмом жестко, а с золотником гидравлически, т. е. полужестко. Таким образом, в узле 3 механизма происходит наложение двух полужестких связей: связи подачи гидравлической энергии и связи управления этой последней. Поскольку в таком явлении не все обстоятельства могут быть учтены, то кинематика механизма не может быть выяснена путем одних лишь расчетов с достаточной точностью и определенностью. Задача состояла в экспериментальной проверке расчета, выяснении фактической картины работы машины, в установлении действительной кинематики золотника и ударника и характера их взаимодействия.

Эта задача решалась с помощью высокоскоростной киносъемки следующим образом. К штокам ударника и золотника прикреплялись стрелки 10 (рис. 1) и 6 (рис. 2). Киносъемкой регистрировалось перемещение стрелок-индикаторов, которому соответствовало перемещение вдоль своих осей штоков ударника и золотника.

Расположение аппаратуры при съемке показано на рис. 1. Киносъемка проводилась кинокамерой ККС-1 на 16-мм киноленту 24 (рис. 1) при частоте съемки 1700—2300 сек.⁻¹.

Кинопроектор КПЛ-35 23 (рис. 1) с лампой 3 квт создавал освещенность объекта около 15 000 лк, достаточную для экспонирования на пленке типа ДН при светосиле объектива 1 : 2.

На рис. 3 (вклейка к стр. 280) показаны кадры снятого фильма. В поле кадра были введены шкалы 9 и 22 (рис. 1). Одна из них прикреплялась к корпусу механизма, другая

К ст. М. Н. Негодаева,
стр. 280.

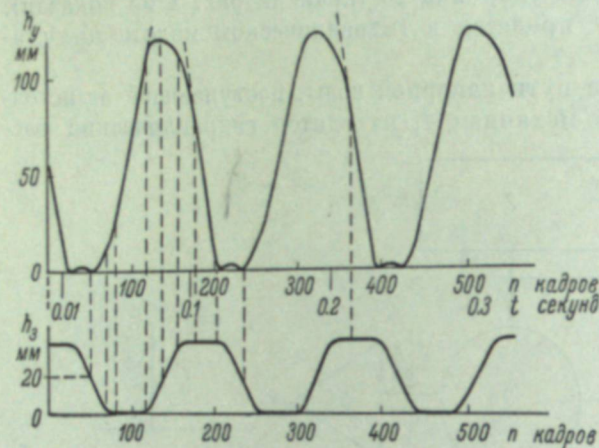


Рис. 4. Графики пути ударника $h_y = f(t)$ и золотника $h_z = \varphi(t)$ гидравлического молота, по данным высокоскоростной киносъемки.

была жестко связана с разрушаемым массивом стенда. Эти шкалы использовались как ориентиры при анализе фильма. Покадровыми измерениями была получена серия значений перемещения стрелок от исходного положения за соответствующие промежутки времени. Построенные по этим данным графики зависимости перемещения ударника h_y и золотника h_z от времени t представлены на рис. 4. Дифференцируя график пути ударника $h_y = f(t)$, получим график его

скорости $v_y = f'(t)$, показанный на рис. 5 совмещенным во времени с графиком пути золотника аналогично рис. 4. Графические построения рис. 4 и 5 позволяют наглядно представить процесс работы гидравлического молота и служат основой для количественного анализа исследуемых явлений.

Кинематографический метод анализа подобного механизма не единственный. Графики движения ударника и золотника могут быть получены иными путями. В применении к данному эксперименту была возможность сравнить кинематографический метод с методом регистрации перемещений штоков ударника и золотника с помощью осциллографа. В последнем случае в исследуемом механизме были установлены емкостные датчики. При движении штоков изменялась емкость в датчиках и осциллограф регистрировал эти изменения.

Трудоемкость применения этих двух сравниваемых методов неодинакова.

Если покадровый анализ снятого фильма требует значительной затраты времени, порядка десятков часов, то подготовка киносъемки и ее выполнение в подобном случае отличаются простотой и связаны с малой потерей времени. Осциллограмма представляет уже готовый график зависимости перемещения штоков от времени, но приспособление датчиков осциллографа к исследуемой машине и их наладка сопряжены со значи-

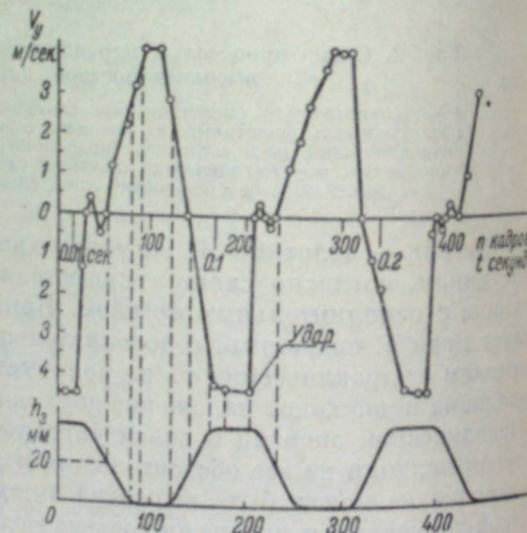


Рис. 5. Графики скорости штока ударника $v_y = f'(t)$ и пути штока золотника $h_z = \varphi(t)$ гидравлического молота, по данным высокоскоростной киносъемки.

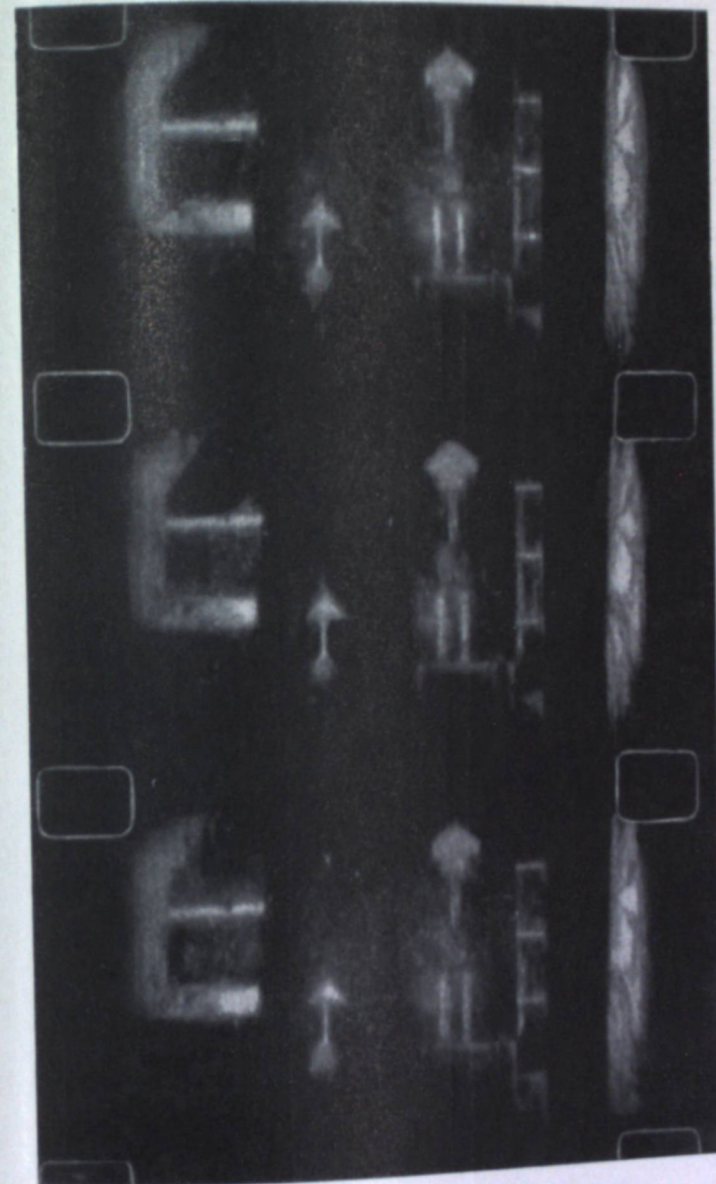


Рис. 3. Кадры фильма высокоскоростной киносъемки гидравлического молота (частота съемки 2300 сек.⁻¹).

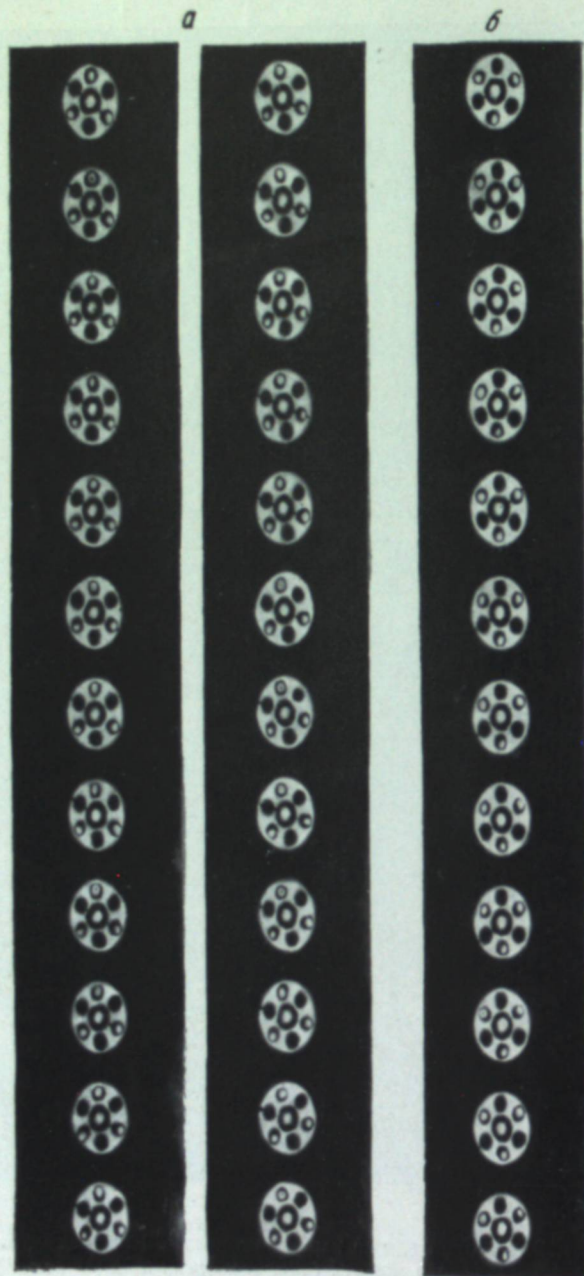


Рис. 2. Образец снятого фильма.

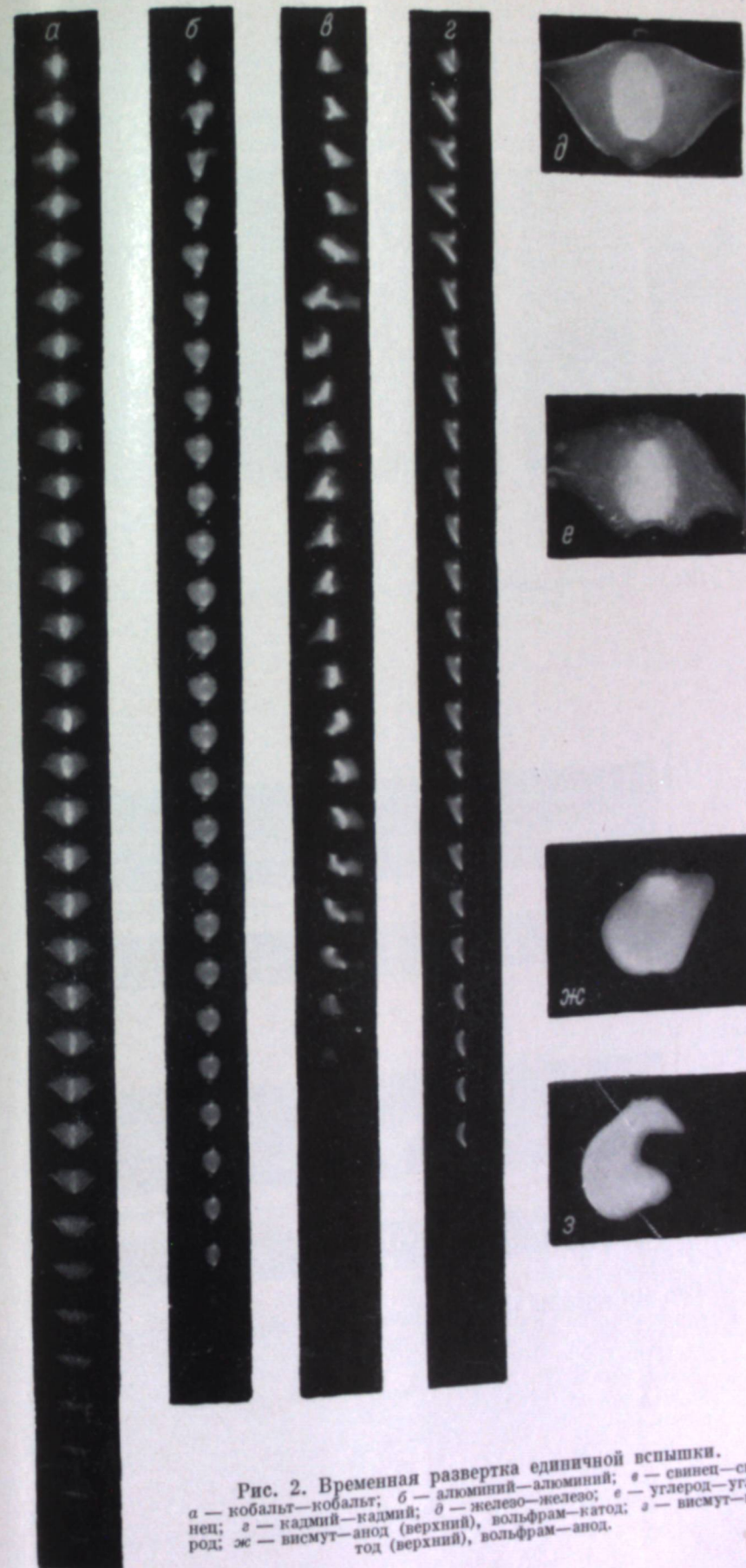


Рис. 2. Временная развертка единичной вспышки.
а — кобальт—кобальт; б — алюминий—алюминий; в — свинец—свинец; г — кадмий—кадмий; д — железо—железо; е — углерод—углерод; ж — висмут—анод (верхний), вольфрам—катод; з — висмут—катод (верхний), вольфрам—анод.

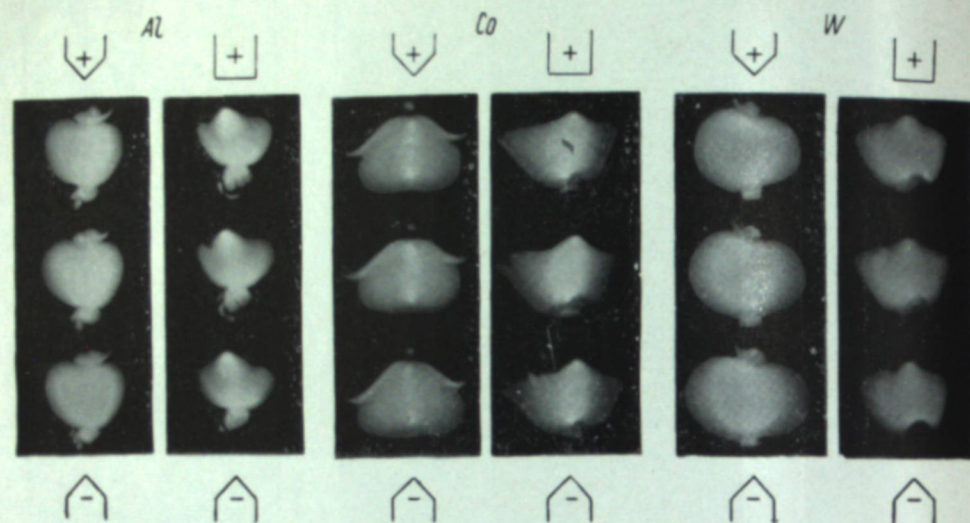


Рис. 3. Влияние формы электродов на строение излучающего облака.

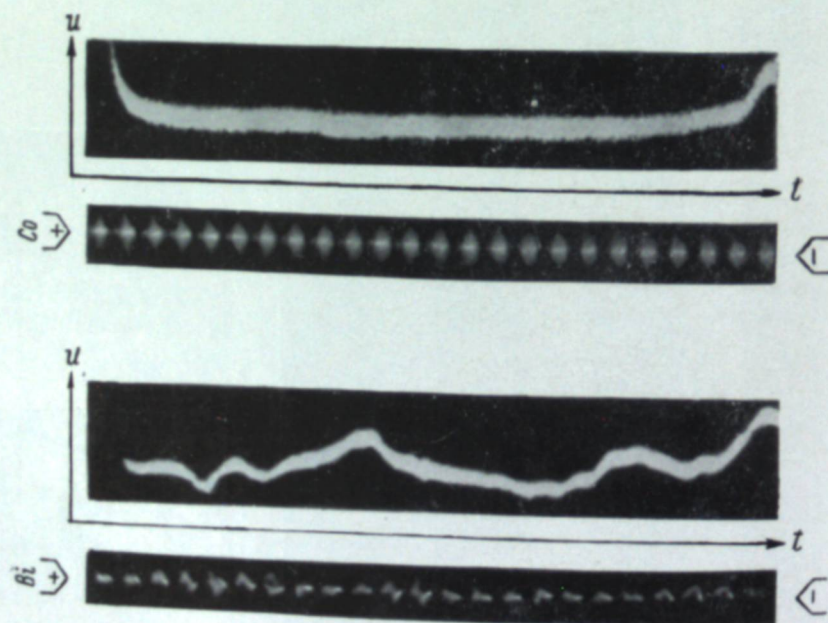


Рис. 4. Временная развертка единичной вспышки и напряжения.

тельной затратой времени. Кроме того, следует отметить и некоторую ограниченность метода исследования — киносъемка регистрирует только движение отдельных частей машины, тогда как при осциллографической записи одновременно с регистрацией перемещений штоков регистрировалось давление воды, причем в трех различных участках машины. Преимущество кинематографического метода исследования перед осциллографической записью — его высокая надежность, обуславливаемая простотой и надежностью оптической связи кинокамеры с объектом съемки и нечувствительностью к электрическим помехам, к которым чувствителен осциллограф. В некоторых случаях целесообразно одновременное применение обоих методов исследования, что и было использовано в одном из вариантов данного эксперимента.

Точность методов осциллографической записи и высокоскоростной киносъемки в этом случае была равноценной для ориентировочного анализа. В измерении длины ошибка не превышала 5%.

М. Н. НЕГОДАЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ГОРНОПРОХОДЧЕСКОЙ МАШИНЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКОЙ

В процессе конструктивной разработки экспериментального образца исполнительного органа горной машины для проходки по твердой породе в ВНИИГидроуголь была применена высокоскоростная киносъемка как средство количественного анализа кинематики и динамики механизма.

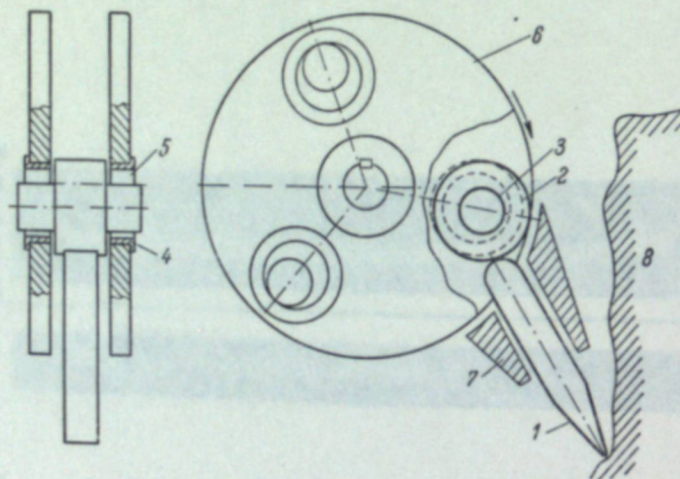


Рис. 1. Схема ударной системы водило—боек—пики.
1 — пики; 2 — боек; 3 — ступица бойка; 4 — втулка из стали повышенной прочности; 5 — окно в водиле; 6 — водило; 7 — держатель пики; 8 — горная порода.

Особенностью методики было сочетание покадровых измерений с вспомогательным графическим расчетом и физической интерпретацией явления. Это позволило построить энергетическую картину работы исследуемого механизма, нужную для оценки принципа действия и конструкции машины: найти причину потерь в нем, определить КПД, определить энергию удара, вывести баланс энергии.

Конкретным объектом исследования был исполнительный орган ударно-вращательного действия. Его схема: водило—боек—пики (долото) (рис. 1). Приводимое во вращение электрическим или гидравлическим приводом водило увлекает за собою роликообразный боек. Боек, встречая на своем пути хвостовик пики, наносит по последнему удар, который передается в забой на разрушение породы. Таким образом, в динамич-

ческой цепочке водило является звеном, отдающим кинетическую энергию бойку. Боек же выполняет роль промежуточного звена между водилом и пики, передавая пики путем удара энергию, полученную им от водила. В водиле экспериментального органа на одну пику приходится три бойка. Диаметр окон водила, в которых удерживаются ступицы бойка, на 25 мм больше диаметра ступиц. Это предоставляет бойку некоторую свободу движения, но в то же время лишает цепочку определенности в кинематической связи. Поэтому траектория бойка не может быть построена так, как это удалось бы при жесткой кинематической связи. Целью и смыслом

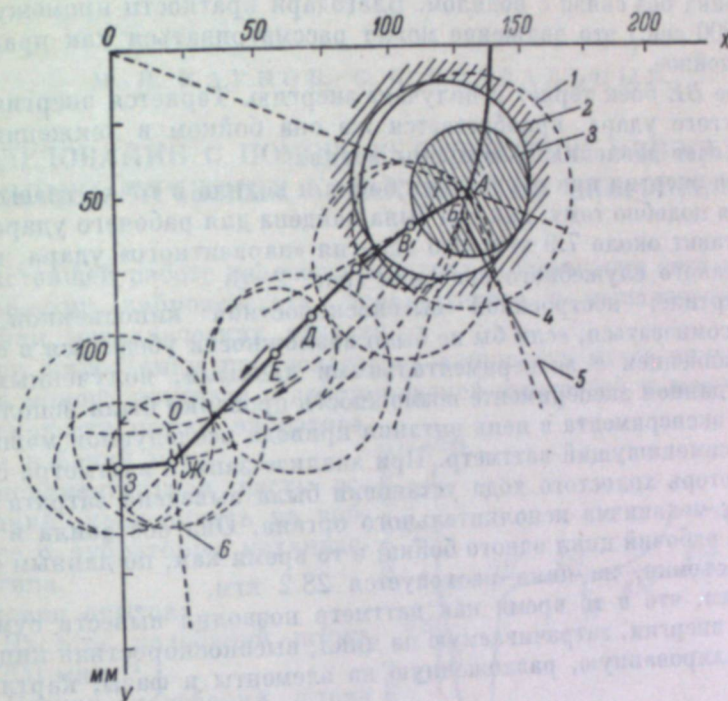


Рис. 3. Траектория абсолютного движения ударника по данным скоростной киносъемки.

1 — ролик бойка; 2 — окно; 3 — ступица бойка; 4 — область удара; 5 — ось пики; 6 — область паразитного удара. АВ — свободный пробег после удара; BE — движение в контакте с окном; EJ — свободный пробег; JK — движение в контакте со ступицей.

применения скоростной киносъемки в этом случае было экспериментальное определение фактической траектории бойка, как основы всего дальнейшего расчета.

Съемка производилась камерой СКС-1 на пленке типа ДН чувствительностью 360 ед. ГОСТа. Для освещения использовались 2 кинопржектора КПЛ-35 с лампами мощностью 3 квт. Применявшаяся частота киносъемки 3000—4000 кадров/сек. была для данного случая достаточной.

Для покадровых измерений использовался инструментальный измерительный микроскоп типа БМИ.

На фильме (рис. 2, а и б; см. вклейку, стр. 281) фиксировался диск водила со ступицами бойков, сидящими в его окнах. По поведению ступиц бойка, доступных для фоторегистрации, можно было судить о поведении всего бойка, недоступного полностью для непосредственного наблюдения. При измерениях начало осей декартовых координат совмещалось с осью вращения водила. На рис. 3 показана траектория центра тяжести бойка за один рабочий цикл, построенная по результатам покадровых измерений.

В точке *A* траектории скорость бойка, как видно, резко меняет свое направление. Причина этого — отскок бойка после полупружного удара по пике. В движении от точки *A* до точки *B* боек контакта с водилом не имеет. Это видно на первых 10 кадрах приведенного здесь отрезка фильма (рис. 2, *a*).

В точке *B* траектории между бойком и окном происходит встреча, после чего до точки *E* боек и окно движутся в контакте.

В фазе *EЖ*, как видно из рис. 3, контакт между бойком и водилом прекращается вследствие изменения направления скорости водила. На участке траектории *EЖ* происходит второе свободное, по инерции, движение бойка без связи с водилом. Благодаря краткости промежутка времени (1/200 сек.) это движение может рассматриваться как практически прямолинейное.

В фазе *BE* боек теряет и получает энергию. Теряется энергия за счет полупружного удара, приобретает же она бойком в движении в контакте за счет давления со стороны водила.

Потеря энергии при соударении бойка и водила в точке траектории *Ж* находится подобно тому, как она была найдена для рабочего удара в точке *A*, и составит около 7.9 кгм. Это энергия «паразитного» удара, не имеющего никакого служебного значения (рис. 2, *b*).

В картине, построенной высокоскоростной киносъемкой, можно было бы сомневаться, если бы не было возможности убедиться в ее реальности сравнением с экспериментальными данными, полученными иным путем. В данном эксперименте возможность проверки была использована; во время эксперимента в цепь питания привода исследуемой машины был включен самопишущий ваттметр. При анализе записи ваттметра с исключением потерь холостого хода установки была выведена затрата энергии на работу механизма исполнительного органа. Она составила в среднем 30 кгм на рабочий цикл одного бойка, в то время как, по данным скоростной киносъемки, на цикл расходуется 28.2 кгм.

Заметим, что в то время как ваттметр позволил вывести суммарную величину энергии, затрачиваемую на цикл, высокоскоростная киносъемка дала детализованную, разложенную на элементы и фазы, картину.

М. Я. КАРНОВ, С. П. ПОДВАЛЬНЫЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ СКОРОСТНОЙ КИНОСЪЕМКИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОПРЕССА

В настоящей работе изложена методика исследования кинематических характеристик виброагрегата, используемого в машиностроении для штамповки металлических изделий.

Путем киносъемки предполагалось установить мгновенную скорость штока в момент контакта с деформируемой заготовкой и характер изменения скорости штока вибратора за один рабочий цикл.

Экспериментальная часть исследований проводилась на вибропрессе с вибратором механического типа.

Условия опытов:

1. Частота колебаний штока 900—1200 мин.⁻¹.
2. Размах колебаний штока 4—12 мм.
3. Образцы цилиндрической формы из стали 40ХНМА, 25×30 мм и алюминиевого сплава АК-6.50××50 мм.
4. Осадка в холодном состоянии.

Частота съемки определялась по формуле

$$W_c = \frac{1}{m} \frac{v}{\delta} k,$$

где $\frac{1}{m}$ — масштаб изображения; v — средняя линейная скорость движения объекта (мм/сек.); δ — допустимый внутрикадровый сдвиг (принят 1/20 мм); k — коэффициент обтюрации камеры (у 16-мм кинокамеры СКС-1 $k=0.2$).

Исходя из того, что за рабочий цикл перемещения штока линейная скорость периодически возрастает от нуля до максимума, для получения изображения резким в местах движения с наибольшей скоростью и особенно важных для исследования вычисленные значения частоты увеличивались в 2.5—3 раза.

Съемка производилась камерой СКС-1 (16 мм) на негативную пленку типа А-2 чувствительностью 180 ед. ГОСТа.

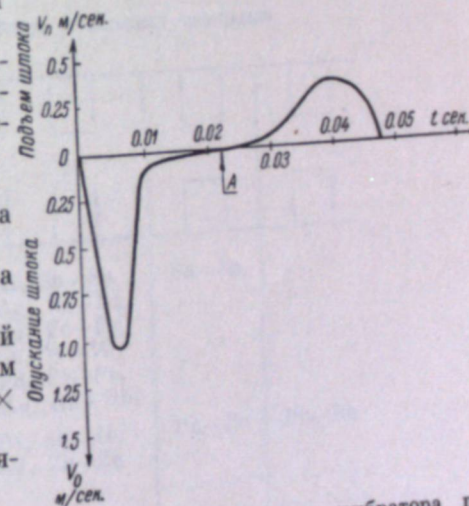


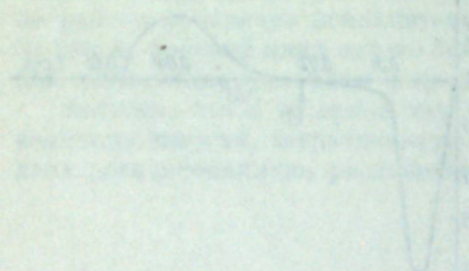
График скорости штока вибратора при деформации алюминиевого сплава АК-6, $W=1050$ колебаний/мин., $A=12$ мм, по материалам киносъемки.

С целью исключения ошибок в линейных измерениях, которые могли возникнуть в результате передачи вибрации пресса на киносъемочную камеру, установку ее вместо штатива производили на платформу, подвешенную к мостовому крану.

Для определения скорости штока в момент контакта с заготовкой или штампом на шток наклеивалась клеем БФ-2 бумажная визирная марка с нанесенными тушью на ее поверхности параллельными вертикальными и горизонтальными штрихами через 5 мм. Линейным масштабом, с помощью которого при анализе определялся истинный путь, пройденный штоком, являлось снятое в кадре расстояние между штрихами. Отметчик времени подключался к сети с напряжением 120 в и частотой 50 гц.

Линейное измерение пройденного пути штока проводилось относительно отверстий перфорации, принимаемых за неподвижное начало координат.

Таким образом, по результатам экспериментальных данных были построены эпюры, характеризующие изменение скорости штока за цикл обработки заготовок из сплава АК-6 (см. рисунок).



И. И. КОРШАКЕВИЧ, В. В. СПИРОВ

ДИНАМИКА МАЛОАМПЕРНЫХ ДУГОВЫХ РАЗРЯДОВ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Активизированная дуга переменного тока находит широкое применение в практике спектрального анализа. По своему характеру это нестабильный и неоднородный источник света. За единичную вспышку катодное и анодное пятна находятся в беспорядочном перемещении по поверх-

Таблица 1

Тип разряда	Форма и материал электродов			
I	Al—Al, Sn—Sn, Ag—Ag, Ni—Ni, Cu—Cu, Fe—Fe, Co—Co, W—W, Pd—Pd, Pt—Pt, Au—Au, Rh—Rh		Sn—Sn	
II	Bi—Bi, Sb—Sb, Cd—Cd, Zn—Zn, C—C		Pb—Pb	Pb—Pb

ности электродов. Одновременно изменяются интенсивность излучения и межэлектродное падение напряжения.

Целью настоящей работы является изучение влияния материала электродов на развитие светящегося облака разряда, поведения катодного и анодного пятен и величины флуктуаций межэлектродного падения напряжения за время единичной вспышки.

Для исследования этих процессов была использована высокоскоростная киносъемка камерой СКС-1 в масштабе 1 : 1. Для съемки дуги принялся объектив «Юпитер-3» при относительном отверстии 1 : 4, киносъемка велась на киноплёнку типа ДК с частотой 4500—5500 сек.⁻¹. Одновременно с помощью шлейфового осциллографа регистрировался ток и напряжение дуги. Всего было снято около 90 фрагментов.

В табл. 1 и 2 представлены пары электродов дуги, разряды между которыми были исследованы. Дуговой разряд возбуждался генератором

с электронным управлением поджига типа ГЭУ-1. Амплитудное значение тока 7а, межэлектродное расстояние 3 мм, длительность единичной вспышки 5 мсек., частота следования 50 гц. Фиксация временной развертки единичной вспышки занимала около 25 кадров, при этом на одном кадре фиксировался процесс длительностью порядка 0.2 мсек.

Таблица 2

Тип разряда	Материал электродов ¹
I	Cu—Co, Ag—Al, Ag—Cu, Ag—Ni, Pt—Pd, Pt—Co, Pt—Ni, Ni—Fe, Pt—W, Pt—Al, Sn—W
II	Zn—Cd
I—II	C—Al, C—Cu, C—Ni, Zn—Ni, Bi—W, Pb—Co, Cd—W, Bi—Al, Pb—Al, Cd—Al, Pt—W, Sb—Al, C—W, C—Fe, C—Zn

Электроды изготовлялись из различных материалов в виде стержней диаметром 6 мм и с рабочими поверхностями различной формы (заточенные на конус и плоские). Чтобы исключить влияние нагрева электродов на стабильность параметров разряда (1), применялось интенсивное водяное охлаждение электродов. Кроме того, дуга включалась только тогда,

когда скорость камеры достигала заданного значения.

Схема синхронизации запуска кинокамеры СКС-1 и генератора ГЭУ-1 представлена на рис. 1. При нажатии на кнопку КН срабатывают реле времени РВ-1 и РВ-2, установленные на время 1.1 и 0.4 сек. соответственно. Замыкание контактов РВ-1 приводит в действие кинокамеру К. Через 0.4 сек. после включения схемы контакты РВ-2 приходят в исход-

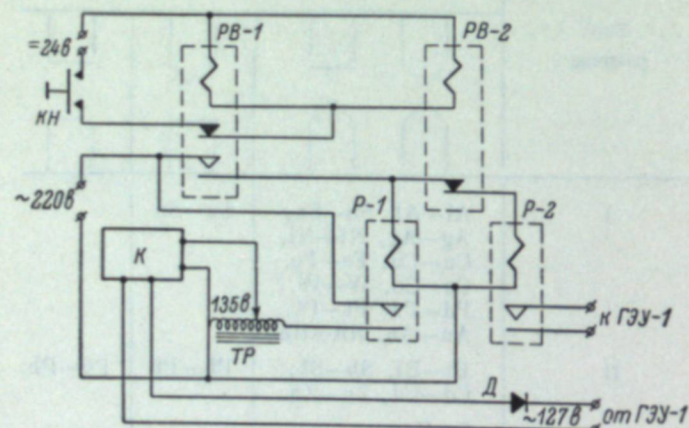


Рис. 1. Схема синхронизации запуска кинокамеры СКС-1 и генератора дуги ГЭУ-1.

КН — пусковая кнопка; РВ-1 и РВ-2 — пневматические реле времени ПЭРВ-45; Р-1 и Р-2 — реле МКУ-48; К — кинокамера СКС-1; Д — диод в цепи от камеры.

ное положение, и включается генератор дуги. Выключается вся схема через 1.1 сек. Такая работа камеры и дуги позволила зафиксировать начальные 50 вспышек после включения дуги, а на последних метрах пленки получить развертку частотой до 6500 сек.⁻¹. Отметчик времени камеры, включенный параллельно дуге через диод Д, делает отметки только в положительные полупериоды напряжения, что позволяет определить полярность каждой вспышки.

¹ Оба электрода заточены на конус.

Изучение полученных кинофильмов позволило выявить некоторые закономерности в поведении облака разряда, катодного и анодного пятен за время единичной вспышки в зависимости от материала электродов.

Наблюдается два типа разряда, существенно различающихся поведением облака и пятен. Соответственно этому делятся материалы электродов.

Электроды разряда I типа служат металлы с температурой кипения больше 2000° С и теплотой испарения выше 60 ккал./г · атом (табл. 1). Для них характерно малоподвижное облако овальной формы с неподвижным анодным пятном (рис. 2, а, б, в; см. вклейку, стр. 288). Катодное пятно малоподвижное (железо, алюминий, вольфрам и др.) или же перемещается у некоторых металлов со скоростью до 5 м/сек. (платина, золото и др.). Перемещение катодного пятна не влияет на поведение центральных участков облака. По особенностям строения облака в этом типе можно выделить разряды между электродами из железа, никеля и кобальта (рис. 2, а, в). Для них характерно плотное овальное ядро, окруженное ореолом. Во второй половине вспышки вокруг ореола возникает пленка в виде колокола. Для этих металлов характерно большое время свечения после прекращения прохождения тока дуги, равное 1—1.5 мсек., а для остальных металлов оно составляет 0.2—0.5 мсек.

Электроды разряда II типа служат металлы с температурой кипения меньше 2000° С и теплотой испарения ниже 60 ккал./г · атом. Для них характерно чрезвычайно подвижное облако в виде извивающейся конической струи, направленной к аноду (рис. 2, в, г). Анодные и катодные пятна очень подвижны, и только у кадмиевой и цинковой дуг катодное пятно неподвижно. Движение облака определяется направлением выброса струи и связано с перемещением пятен.

Дуга между графитовыми электродами обладает свойствами разрядов обоих типов (рис. 2, е).

Надо заметить, что для большинства дуг разряд происходит не по кратчайшему расстоянию, а уходит в сторону или изгибается. При наблюдении за катодным и анодным пятнами создается впечатление, что существуют одновременно несколько каналов и пятен, однако это необходимо проверить, увеличив скорость съемки на три порядка. Наблюдаются выбросы светящихся частиц с поверхности электродов со скоростями 5—10 м/сек. Для разрядов I типа и графита эти выбросы происходят из обоих электродов, а для II типа — преимущественно из катода.

Существенное влияние на поведение облака разряда оказывает форма электродов. Так, например, для разряда II типа изменение их формы с конической на плоскую стабилизирует облако и уменьшает подвижность пятен. Для разряда I типа такая замена приводит к обратному эффекту. Кроме того, у некоторых разрядов это изменение формы электродов вызывает изменение распределения интенсивности излучения (рис. 3; см. вклейку, стр. 289).

Поведение и структура облака разряда между электродами из двух различных металлов определяются материалом катода. Например, облако подразряда между висмутом и вольфрамом имеет различную форму и подвижность в зависимости от того, какой металл служит катодом (рис. 2, ж, з).

В течение вспышки величина межэлектродного падения напряжения испытывает колебания различной частоты и амплитуды. На рис. 4 (см. вклейку, стр. 289) представлены кадры киносъемки дуги между электродами кобальтовыми и висмутовыми, а рядом соответствующие осциллограммы напряжения. Колебания напряжения особенно велики в случае быстро движущихся катодных пятен (висмут, свинец и др.) и отсутствуют для неподвижных пятен (вольфрам, алюминий и др.). Средняя величина межэлектродного падения, как правило, возрастает

к концу вспышки, исключение составляет дуга между алюминиевыми электродами.

Наблюдаемые особенности движения пятен определяются сложным комплексом явлений, происходящих в приэлектродной области (флуктуации давления паров и радиального распределения потенциала в области пятна, степень окисления поверхности электродов и пр.), и в зависимости от их сочетания проявляют себя в различной степени. Развитие существующих представлений о механизме испарения требует дальнейшего изучения поведения катодного и анодного пятен.

В. Г. ПЕЛЛЬ

МАССОВАЯ ПОДГОТОВКА СТУДЕНТОВ ВУЗОВ К ПРИМЕНЕНИЮ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ И КИНЕМАТОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ

Фотографические и кинематографические методы регистрации в настоящее время все шире и шире применяются при научных и технических исследованиях в различных областях народного хозяйства. Применение этих методов в астрономии, ядерной физике, при микроскопических исследованиях, в спектроскопии, картографии стало сегодня обыденным и не вызывает ни у кого удивления или сомнений. Однако сейчас фотография и кинематография вторгаются как полноправные и часто незаменимые методы исследования в машиностроение и в сельское хозяйство, в медицину и в химическую промышленность, в авиационное и в геологическое, в легкую и в горнодобывающую промышленность, в космические исследования и в физкультуру. Этот краткий и неполный перечень показывает, что фотографические и кинематографические методы регистрации представляют большой практический интерес для многих сфер человеческой деятельности.

Из числа многочисленных разновидностей фотографических и кинематографических методов регистрации наибольший интерес представляют высокоскоростная фотография и кинематография, позволяющие получать изображения быстропротекающих процессов и явлений, недоступных прямому наблюдению. Однако в основе методов высокоскоростной фотографии и кинематографии лежат те же принципы, на которых основаны и другие фотографические и кинематографические методы исследования.

Поэтому подготовка специалистов не может ограничиваться одними лишь вопросами высокоскоростной фотографии и кинематографии. Она должна включать в себя также и изучение общих основ научной фотографии и кинематографии.

Подготовка специалистов в области научной фотографии и кинематографии должна осуществляться по двум направлениям: подготовка специалистов различных профилей (инженеров, врачей, научных сотрудников, специалистов сельского хозяйства, педагогов и др.) к применению фотокинематографических методов в их основной работе по специальности и подготовка специалистов по разработке аппаратуры и методов специального применения фотографии и кинематографии.

Более чем десятилетний опыт работы Кафедры научной и учебной фотографии и кинематографии МГУ им. М. В. Ломоносова по преподаванию курса основ научной фотографии и кинематографии значительной части студентов I и II курсов естественных факультетов университета

позволяет наметить пути организации массовой подготовки специалистов народного хозяйства к применению фотокинематографических методов в их повседневной работе. Можно наметить минимальный объем знаний и навыков по фотографии и кинематографии, освоение которых следует считать необходимым для значительной части выпускаемых вузами специалистов. В программу обучения должны входить краткие сведения об истории развития фотоаппаратного метода, элементы фотографической оптики, элементы фотографической аппаратуры, основные типы современной фотоаппаратуры, основы теории фотографического процесса, строение и типы фотографических слоев, свойства фотографических слоев, процессы химико-фотографической обработки светочувствительных слоев, понятие о цветной фотографии, принципы освещения объектов съемки, экспонометрия, специальные виды съемки (репродукционная съемка, макросъемка, микросъемка, стереосъемка, панорамная съемка, съемка с импульсным освещением, съемка в невидимых лучах спектра, съемка в полевых условиях, измерительная съемка и др.), киносъемочная аппаратура, техника киносъемки, специальные виды киносъемки (замедленная и скоростная киносъемка), принципы и аппаратура кинопроекции, применение кинофильмов в учебном процессе.

Опыт показывает, что для прохождения курса основ научной фотографии и кинематографии по предлагаемой программе с проведением необходимого количества практических работ достаточно приблизительно 60 академических часов, из которых около 25 являются лекционными, а остальные посвящены выполнению практических работ. Для студентов, подготавливаемых к работе в полевых условиях (геологи, географы, работники сельского хозяйства и др.), программа дополняется практическими работами в полевых условиях.

По нашему мнению, курс основ научной фотографии и кинематографии должен быть со временем введен во всех вузах, на естественных факультетах университетов, в медицинских институтах, в сельскохозяйственных институтах и на естественных факультетах педагогических институтов страны. Сначала курс может быть введен только в крупных высших учебных заведениях и на правах факультативного, с постепенным переходом к обязательному со сдачей зачета, подобно тому как это было в МГУ.

Прохождение основного курса не исключает необходимости преподавания для студентов старших курсов некоторых специальных курсов по отдельным вопросам научной и прикладной фотографии и кинематографии. В МГУ читаются, например, такие курсы, как специальные виды фото- (для гистологов, микробиологов, палеонтологов, картографов) и киносъемки (для механиков, физиков), полевая киносъемка (для геологов, географов, биологов), цветная фотография, теория фотографического процесса (для астрономов, спектроскопистов, физиков).

В других высших учебных заведениях возможно введение и других специальных курсов. Можно предполагать, что в большинстве технических вузов основным специальным курсом окажется курс специальных видов киносъемки, в котором большая часть материала будет посвящена технике высокоскоростной киносъемки.

Весьма важной является проблема подготовки кадров преподавателей для чтения описанных курсов. В настоящее время в немногочисленных вузах страны, в которых ведется сколько-нибудь систематическое преподавание курсов научной фотографии и кинематографии, для ведения занятий привлекаются специалисты из смежных областей: специалисты по фотохимии, аэрофотосъемке, оптике, светотехнике, кинопроекционной технике и другие, имеющие обычно по ряду своей предшествующей деятельности опыт работы по применению фотографии и кинематографии в научных и технических исследованиях.

Это положение, в какой-то степени сегодня удовлетворительное, ставит под угрозу дальнейшее широкое развитие обучения молодых специалистов основам применения фотокинематографических методов в их будущей практической работе.

По нашему мнению, проблема подготовки преподавательских кадров может быть решена двумя путями: путем развития начатой в Ленинградском институте киноинженеров подготовки специалистов по инженерной фотографии и кинематографии и путем организации краткосрочных курсов повышения квалификации лиц смежных профилей, имеющих высшее образование. Такие курсы целесообразно организовать при ЛИКИ, а, возможно, также при ГОИ, НИКФИ, МГУ и других организациях подобного профиля. Аналогичным образом возможна организация подготовки преподавательского состава высшей квалификации через аспирантуру.

Многообразие методов и приемов современной научной фотографии и кинематографии, широкое использование ею элементов из других областей науки и техники заставляют требовать от специалиста по научной фотографии и кинематографии, в том числе и от преподавателя, весьма обширных специальных знаний. Очевидно, в учебный план подготовки таких специалистов должно войти изучение таких специальных дисциплин, как теория фотографического процесса, сенситометрия, обработка кинофотоматериалов, фотографическая фотометрия, оптика, светотехника, основы электротехники, основы электроники, импульсная техника, основы электроавтоматики, детали машин и механизмов, фотографическая аппаратура, киносъемочная аппаратура, специальная киноаппаратура, специальные виды фото- и киносъемки, стереофотограмметрия, основы телевизионной техники, астрофотография, ядерная фотография, принципы дешифрирования фотографических изображений, монтаж кинофильма, основы учебной кинематографии.

СОДЕРЖАНИЕ¹

Стр.

Предисловие	3
-----------------------	---

Приборы и аппаратура для высокоскоростной съемки

С. М. Проворнов, О. Ф. Гребенников. Основные характеристики высокоскоростных киносъемочных камер	5
С. Г. Гренишин, Ю. П. Щепеткин. Об увеличении частоты съемки при прерывистом движении пленки *	12
И. И. Крыжановский. Высокоскоростная киносъемочная камера ждущего типа ССКС-3*	17
И. И. Крыжановский. Высокоскоростная киносъемочная камера ждущего типа ССКС-4	22
И. И. Крыжановский. Высокоскоростная киносъемочная камера с частотой съемки до 6 000 000 кадров в секунду	24
С. М. Проворнов, О. Ф. Гребенников, В. П. Гусев. Растровая камера РКС-2 для съемок с частотой до 500 млн кадров в секунду	27
Л. В. Акимкина, М. Д. Бодрова, С. П. Иванов, Д. Ф. Ивченко. Сравнительные исследования английской растровой камеры серии 600 фирмы Томпсон и отечественной растровой камеры РКС-1	29
Н. А. Валюс, Г. С. Арушанов, В. П. Генералова. Скоростной фоторегистратор с волоконной оптикой и электронно-оптическим преобразователем	33
Л. В. Акимкина, С. П. Иванов, Д. Ф. Ивченко, П. К. Skorobogatov. Скоростная стереокиносъемка с переменным базисом камерой СКС-1*	37
А. Б. Гранитг. Некоторые вопросы расчета высокоскоростных камер с зеркальной разверткой *	40
Е. А. Тарантов. К расчету высокоскоростных съемочных камер с непрерывной зеркальной разверткой *	48
В. К. Баранов. Принципиальная схема устройства для непосредственного наблюдения быстротекущих процессов	54
Л. Н. Пятницкий. Применение для высокоскоростной кадровой съемки электронно-оптического преобразователя ПИМ-4, управляемого электронной схемой *	58
М. И. Пергамент, Ю. Е. Нестерихин, В. С. Комельков. Электронно-оптические высокоскоростные кадровые съемочные камеры для исследования быстротекущих процессов *	64
М. М. Бутслов, В. С. Комельков, Ю. Е. Нестерихин. Электронно-оптический прибор для исследования изменения во времени полуширины и интенсивности спектральных линий*	72
В. И. Баюнов, М. И. Демидов, И. В. Подмошенский. Спектрохронограф с электронно-оптическим преобразователем	76
И. Ф. Балашов, В. Р. Муратов, Е. В. Нилов. Информационная пропускная способность электронно-оптического преобразователя	79
Е. Н. Браго. Схема питания и управления электронно-оптическим преобразователем для исследования быстротекущих процессов	84

¹ Статьи, отмеченные звездочкой, доложены на втором совещании по высокоскоростной фотографии и кинематографии.

Источники света

Стр.

И. С. Маршак, Л. И. Щукин. Новые данные о физических и эксплуатационных параметрах импульсных ламп*	93
Л. Н. Быховская, И. Ш. Либин, Ф. А. Чарная. Азотные импульсные лампы*	106
В. П. Кирсанов, В. П. Жильцов, И. С. Маршак, В. Ф. Разумцев, Е. Х. Слудкин, Л. И. Щукин. Новые импульсные лампы с высокой частотой повторения вспышек	109
М. П. Ванюков, А. А. Мак. Исследование импульсных источников света предельно высокой яркости *	115
М. П. Ванюков, В. И. Исаенко, В. В. Любимов. Исследование пространственной нестабильности тела свечения лампы высокого давления, работающих в режиме повторных вспышек	116
М. П. Ванюков, В. И. Исаенко, Г. Н. Травлеев. Предельные нагрузки импульсных ламп, работающих в режиме повторных вспышек *	121
А. Л. Вассерман, Б. В. Скворцов. Элементы схем питания импульсных ламп *	126
М. П. Ванюков, Н. М. Галактионова, А. А. Мак. Излучение импульсных источников света в ультрафиолетовой области спектра	131
В. А. Гаванин. Фотометрирование импульсных источников света *	138
А. А. Воробьев, Г. А. Воробьев, Г. А. Месяц. Использование некоторых свойств газового разряда для получения высоковольтных наносекундных импульсов	142
С. И. Андреев, М. П. Ванюков, Е. В. Даниэль. Методы сокращения длительности световых вспышек, излучаемых искровым разрядом	147
М. П. Ванюков, Н. М. Галактионова, В. Ф. Егорова, А. А. Мак. Излучение искрового разряда, происходящего в смесях газов	151
С. И. Андреев, М. П. Ванюков. Получение интенсивных световых вспышек длительностью $10^{-7} \div 10^{-8}$ сек. с помощью искрового разряда *	153
И. С. Маршак, В. И. Васильев, А. Л. Вассерман, И. Л. Тохадзе. Сверхмощные безбалластные трубчатые ксеноновые лампы — новый вид эффективного источника света для скоростной киносъемки	159
В. А. Горшков, И. В. Подмошенский, Л. В. Попов. Использование тяжелых элементов в мощном капиллярном источнике света	167
А. А. Воробьев, В. А. Москалев. Источник рентгеновского излучения для скоростной съемки некоторых процессов	171

Применения высокоскоростной съемки

В. Г. Пелль. Некоторые вопросы экспонетрии при скоростных киносъемках *	173
В. Ф. Болотин, Б. А. Демидов, Е. К. Завойский, Ю. Ф. Скачков, Г. Е. Смолкин, С. Д. Фанченко. Дальнейшее развитие метода электронно-оптической хронографии и его применение для физических исследований плазмы *	175
В. С. Комельков, С. С. Цереветинов. Высокоскоростная фотосъемка мощных разрядов в газах*	184
Ф. А. Королев, О. Ф. Куликов, А. С. Яров. Исследование излучения и процесса ускорения электронов в синхротроне с помощью скоростной киносъемки	192
О. К. Экинадисянц. Применение высокоскоростной микрокиносъемки для исследования туманообразования в ультразвуковом фонтанике*	198
В. В. Гарнов. Стереоскопическая фоторегистрация некоторых быстротекущих процессов	201
А. А. Кукибный, В. А. Смородин. Высокоскоростная стереокиносъемка свободного полета зерен*	209
Ю. Б. Свиридов, Е. В. Шатров. Применение скоростной стереокиносъемки при исследовании процессов сгорания*	210
Л. Г. Гвоздева. Исследования отражения и преломления детонационных волн в газовых смесях с помощью камеры СФР-2 *	213
	295

	Стр.
Т. В. Баженова, С. Г. Зайцев, И. М. Набоко. Исследование течения газов в ударной трубе методом высокоскоростной съемки *	215
Г. И. Стрелков, О. И. Ясько. Определение скорости высокотемпературной газовой струи методом фоторазвертки *	219
В. И. Бабий, И. П. Иванова. Применение скоростной киносъемки для исследования движения и горения угольных частиц	220
В. М. Боршанский, П. А. Масличенко, Б. С. Фокин. Механизм движения фаз при пленочном кипении в большом объеме жидкости	222
В. П. Пух. Изучение скорости роста трещин в прозрачных телах с помощью высокоскоростного фотографирования *	228
В. М. Фикель, И. А. Куткин. Исследование роста трещин в твердых телах методом высокоскоростной киносъемки	231
В. Н. Кологривов, А. А. Анчуров. Исследование спектра излучения детонационной волны на спектрографе СП-75	236
П. П. Мостовенко. Применение высокоскоростной киносъемки к исследованию распространения ударных возмущений в резине *	243
Л. К. Малышев. Дешифровка фильма распространения волн напряжений, полученного высокоскоростной кинокамерой СФР при использовании поляризованного света	245
А. П. Федоров. Применение высокоскоростной кинокамеры СФР при исследовании методом оптически активных покрытий распространения волн напряжений в металлических моделях	249
Б. А. Арлов. Применение метода фоторегистрации в интерференционных исследованиях *	254
И. П. Добровольский. Применение высокоскоростной киносъемки в поляризованном свете для изучения распространения волн напряжений *	256
Л. К. Малышев. Использование скоростного фоторегистратора СФР при исследовании распространения волн напряжений методом фотоупругости *	258
А. С. Зингерман. Исследование электрической эрозии скоростной киносъемкой *	262
А. А. Миловидов, В. Г. Аверьянова. Исследование процесса обработки материалов ультразвуком *	265
Э. Т. Джрбашян. Применение скоростной киносъемки для измерения характеристик турбулентного двухкомпонентного потока в открытом канале *	267
К. К. Шальнев, А. А. Миловидов. Структура зоны кавитации в зоне эрозии	271
В. А. Лагунов. Новый метод изучения сил при ударе с помощью высокоскоростного фотографирования *	275
М. Н. Негодаев. Анализ динамики гидравлического молота методом высокоскоростной киносъемки	278
М. Н. Негодаев. Исследование кинематики и динамики исполнительного органа горнопроходческой машины высокоскоростной киносъемкой *	282
М. Я. Карнов, С. П. Подвальный. Исследование с помощью скоростной киносъемки кинематических характеристик вибропресса *	285
И. И. Коршакевич, В. В. Спиров. Динамика малоамперных дуговых разрядов между различными электродами	287
В. Г. Пелль. Массовая подготовка студентов вузов к применению фотографических и кинематографических методов в науке и технике	291

ИСПРАВЛЕНИЯ И ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
32	3 и 6 снизу	РКС-2	РКС-11
51	16 снизу	камеры	камеры [4]
149	Рис. 4	Над рисунком должны стоять буквы: а слева и б справа	
163	2 сверху	(рис. 6)	(рис. 5)
165	23 снизу	(несколько секунд)	(несколько секунд)
168	Правая надпись на вклейке должна быть: К ст. В. А. Горшкова и др., стр. 169.		
184	14 сверху	ЭФР	СФР
193	Подпись под рис. 13 (вклейка), 3 сверху	фагматизированного	флегматизированного
238	1 снизу	плоскость	плотность
241	2 сверху	и непосредственно	непосредственно и
248	26 снизу	(рис. 6,)	(рис. 6, з)
251	4 »	u_p	v_p

Успехи научн. фотогр., т. IX.