

УДК 681.785 : 778.38

УНИВЕРСАЛЬНАЯ 9-КАДРОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ФОТОГРАФИИ

Н. А. Златин, А. И. Козачук,
Г. С. Пугачев, А. Б. Синани

Описана 9-кадровая импульсная фотографическая установка, собранная по известной схеме Кранца—Шардина, обладающая хорошей светосилой и разрешающей способностью и обеспечивающая съемку в диапазоне 10^3 — 10^6 кадр/с. Специально разработанные цифровые электронные устройства измеряют интервалы между кадрами с погрешностью ± 0.1 мкс и обеспечивают с высокой точностью синхронизацию съемки с исследуемым быстропротекающим процессом.

В настоящее время с развитием новой техники заметно вырос интерес к поведению материалов при высокоскоростном нагружении. В этой области разработано немало новых методов исследования [1-3], однако фотографическая регистрация быстропротекающих процессов по-прежнему остается незаменимым источником информации как для понимания различных сторон процесса взаимодействия тел, так и для количественных измерений кинематических характеристик явления в миллисекундном или микросекундном диапазоне времен. В работе описана простая 9-кадровая высокочастотная импульсная фотографическая установка, дающая как теневые снимки объектов, так и снимки объектов в отраженном свете.

Установка построена по принципу последовательного импульсного освещения объекта, известного как метод Кранца—Шардина [3]. Оптическая схема установки (рис. 1, а) достаточно проста. Она состоит из импульсного источника света ИС; коллектива К, формирующего световой пучок; О — объекта съемки; фотокамеры с диафрагмами D_1 и D_2 , объективами Об. и фотопленкой Фл. Как видно из этого рисунка, установка имеет сравнительно небольшие габариты (размеры даны в мм; * — расстояние до отсека светофильтров).

На рис. 1, б изображена блок-схема установки. Для освещения объекта О использовано 9 импульсных ламп 1 ИСШ-5, расположенных на вертикальной стойке в два ряда (5 штук в одном ряду и 4 в другом). Коллективом 2 служат объектив «Гелемар» с фокусным расстоянием 1 м и светосилой 1 : 7. В фотокамере Ф установлено 9 фоторепродукционных объективов 3 РФ-5 с фокусным расстоянием 0.45 м и светосилой 1 : 10. В результате получилось устройство с хорошими оптическими параметрами — разрешением и светосилой: на пленке изображение имеет диаметр 20 мм в масштабе 1 : 5 с разрешением 50 линий на мм, съемку можно производить на обычной фотопленке чувствительностью 90—130 ед. ГОСТ. Описание электронных блоков приведено ниже (рис. 3).

Значительная светосила установки позволяет проводить съемку не только в традиционном теневом режиме, но и в отраженном свете. На рис. 1, в приведена оптическая схема таких опытов. Для этой съемки на поверхность образца О напылялся зеркальный слой 3 алюминия. Для измерения смещений при деформировании поверхности образца на зеркало наносилась сетка с размером ячеек 3 мм. Зеркала 3₁—3₄ изготавливались из листового органического стекла с напыленным алюминиевым слоем. Для юстировки оптической части перед опытом зеркала укреплялись на специальных штативах, допускающих поворот зер-

кал вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. Пунктиром показано положение образца при съемке лицевой поверхности.

На рис. 2, а в качестве примера приведена теневая фотография проникания свинцового ударника через тонкую (толщиной 6 мм) стеклянную пластинку. На фотографиях хорошо видны различные стадии пробития, а также сопровождающие этот процесс ударные волны в воздухе. На рис. 2, б показано по-

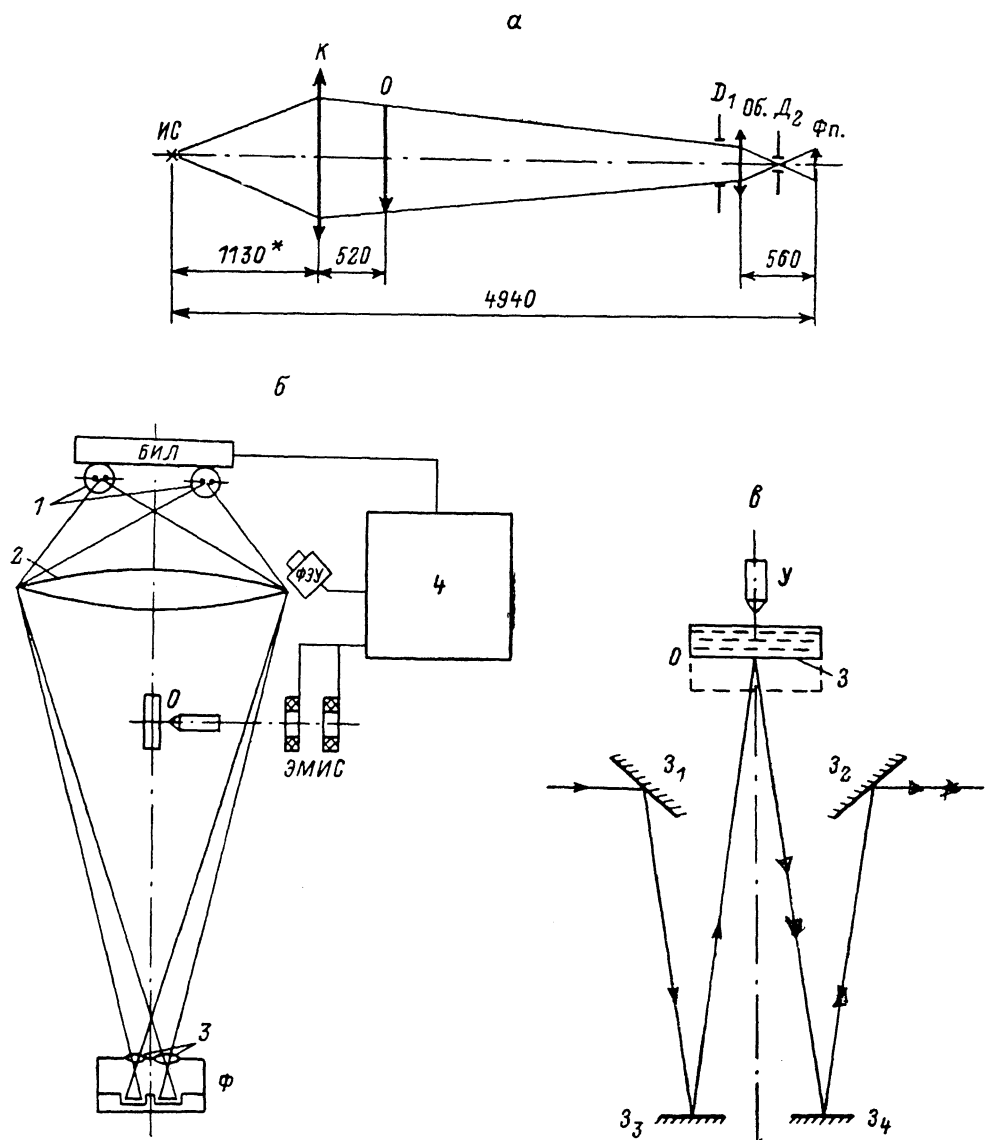


Рис. 1. Оптическая схема высокочастотной фотографической установки [3] (а), блок-схема (б) и оптическая схема съемки лицевой и тыльной сторон стеклянной пластины (в).

ведение лицевой стороны преграды при ударе свинцовым ударником. На фотографиях видны искажения, которые возникают на поверхности образца в процессе соударения: движение поверхностной волны, а также зоны разрушения. Скорость поверхностной волны оказалась равной 3 км/с, что хорошо соответствует скорости релеевской волны в стекле [4]. Скорость распространения зоны разрушения не превышает 1.5 км/с, что близко к предельным значениям скорости трещин в стекле [5].

Электронные блоки установки задают срабатывание импульсных ламп в нужные моменты времени и обеспечивают прецизионное измерение интервалов

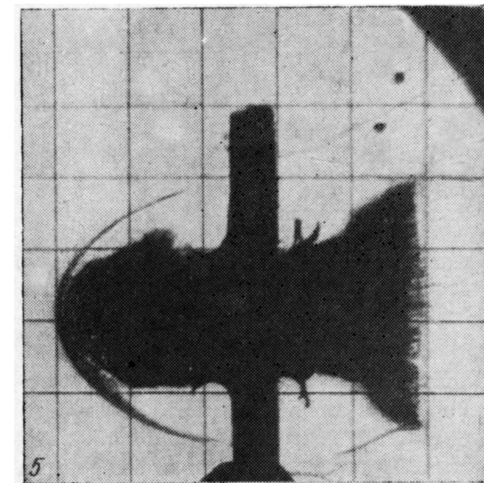
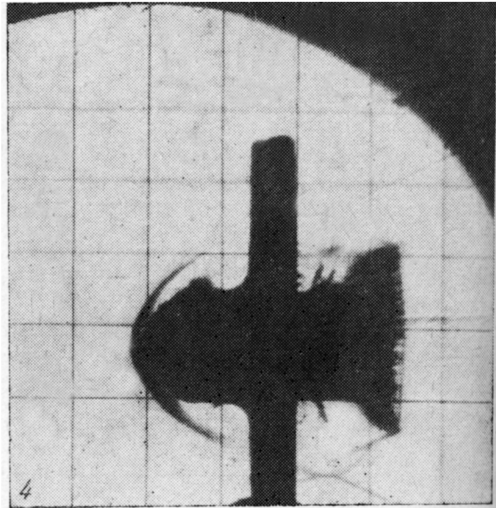
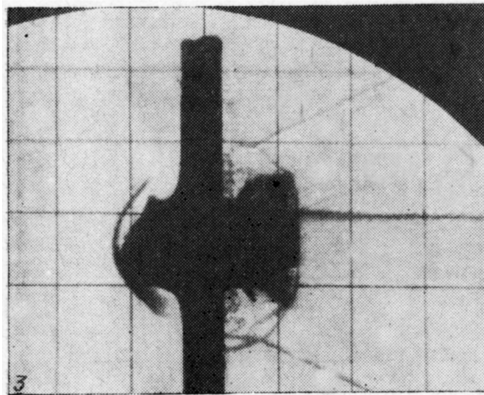
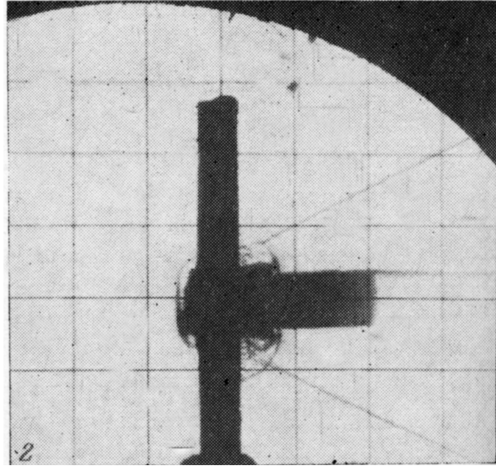
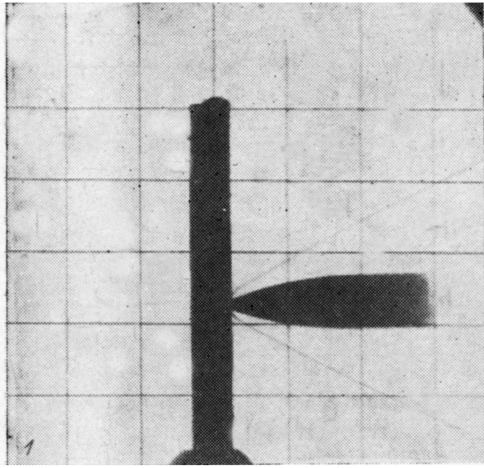


Рис. 2.

a — пробитие стеклянной пластины толщиной 6 мм свинцовым ударником. Скорость ударника — 850 м/с, интервалы времени между соседними кадрами соответственно 9,8, 9,9, 9,8, 10,0 мкс.

времени между вспышками. На рис. 3 представлена функциональная схема электронной части установки, которая состоит из блока импульсных ламп *БИЛ*, блока генераторов *БГ*, блока регистрации *БР*, блока синхронизации *БС*. *БР* состоит из фотоэлектронного умножителя *ФЭУ*, осциллографа, измерителя последовательных временных интервалов *ИПВИ*. *БС* включает в себя электромагнитный измеритель скорости *ЭМИС*, цифровую автоматическую ли-

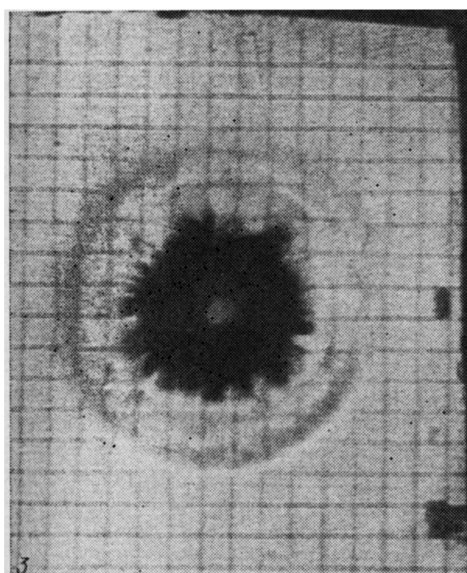
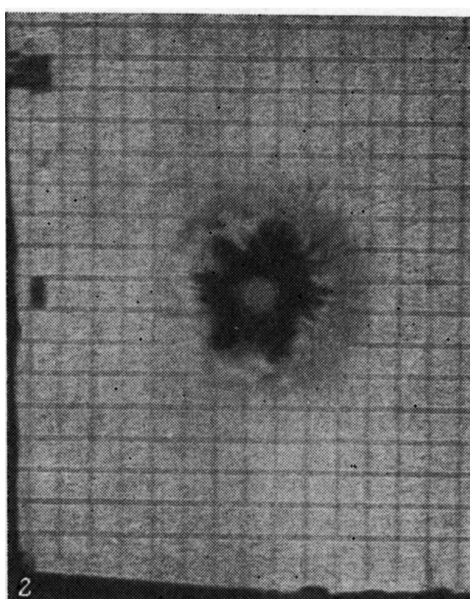
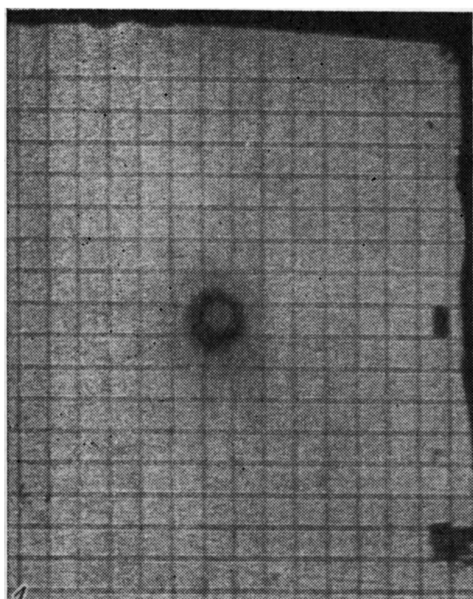


Рис. 2 (продолжение).

б — удар свинцового ударника с $v=860$ м/с по стеклу. 1, 2, 3 — снимки лицевой поверхности образца, время между кадрами равно 2.1 и 2.0 мкс.

нию задержки *ЦАЛЗ*, частотомер ЧЗ-35 и генератор Г4-102. *БИЛ* (предназначен для освещения объекта съемки в различные моменты времени девятью вспышками длительностью 0.3 мкс (по полуширине светового импульса). Питание и цепи поджига импульсных ламп собраны по стандартным схемам [6]. Запуск осветителей *БИЛ* производится *БГ*. *БГ* — это девять (по числу осветителей) импульсных генераторов Г5-15, соединенных по цепи запуска либо последовательно, либо параллельно. Последовательное соединение генераторов предпочтительнее в том случае, когда съемкой необходимо охва-

тять максимальный интервал времени, равный 8 мс, что примерно на порядок превышает интервал при параллельном включении генераторов. Кроме того, в этом случае обеспечивается более высокая стабильность отдельных временных интервалов между вспышками. При параллельном включении осуществляется более жесткая привязка по времени к началу съемки.

С БГ по девяти каналам в БИЛ подаются импульсы прямоугольной формы положительной полярности амплитудой 100 В, которые сдвинуты относительно друг друга на установленные перед опытом промежутки времени. Время сдвига может варьироваться в каждом канале независимо в пределах 1—1000 мкс. Минимальная задержка выходных импульсов генераторов по отношению к импульсу запуска составляет 0.4—0.5 мкс.

Контроль за временным распределением световых импульсов осуществляется с помощью ФЭУ-84, ИПВИ и осциллографа С8-13.

С ФЭУ сигнал в виде последовательности из девяти импульсов поступает на ИПВИ и осциллограф. ИПВИ измеряет временные промежутки между соседними импульсами, и результат выводится на восемь трехразрядных индикаторов времени с погрешностью ± 0.1 мкс. ИПВИ состоит из коммутатора и восьми измерительных каналов. Коммутатор формирует восемь пачек импульсов с частотой заполнения $f_0 = 10$ МГц и длительностью, равной времени между двумя соседними импульсами последовательности, и распределяет пачки по восьми измерительным каналам. Устройство и функционирование измерительных каналов ИПВИ подобно аналогичным узлам стандартных частотомеров. Осциллограф С8-13 служит для визуального контроля последовательности импульсов.

При исследовании быстротекущих процессов первостепенное значение приобре-

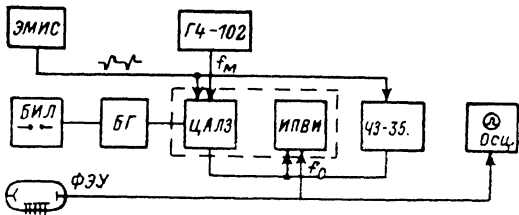
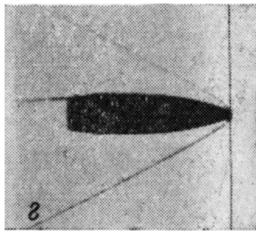
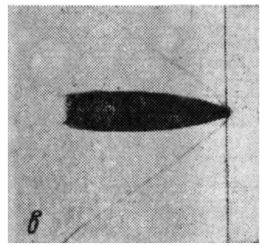
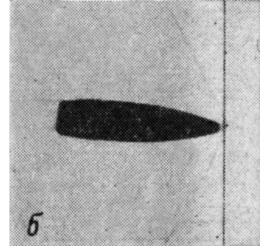
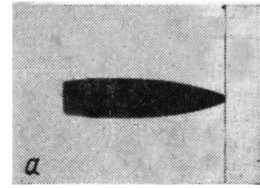


Рис. 3. Функциональная схема электронной части установки.

Рис. 4. Съемки ударников в свободном полете со скоростями 320 (а), 420 (б), 650 (в) и 860 м/с (г).

тает синхронизация явления с регистрирующей параметрами процесса аппаратурой. Для высокочастотной фотографии была создана работающая с высокой точностью схема бесконтактной синхронизации БС.

ЭМИС представляет собой две катушки, находящиеся в поле постоянных магнитов (ферритовые кольца) и расположенные на определенном фиксированном расстоянии друг от друга соосно с траекторией полета ударника. Работа датчика основана на явлении электромагнитной индукции: пролет металлического ударника по оси измерителя вызывает изменение магнитного потока через катушки и возникновение эдс индукции. При заданном расстоянии между катушками (100 мм в нашем ЭМИС) измерение скорости ударника сводится к определению интервала времени между импульсами катушек. В наших опы-

тах использование ЭМИС и частотомера ЧЗ-35 позволяет определять скорость ударника в диапазоне 30—1000 м/с с погрешностью не более $\pm 0.5\%$.

В качестве бесконтактного синхроимпульса в установке использован сигнал, вырабатываемый 2-й катушкой ЭМИС при пролете через нее ударника. Поскольку эта катушка значительно удалена от места съемки, для управления съемкой необходима специальная линия задержки, учитывающая время пролета ударником указанного расстояния. Очевидно, время задержки будет зависеть как от расстояния между катушкой ЭМИС и точкой съемки (что заранее известно с хорошей точностью), так и от скорости ударника, которая может варьироваться в широких пределах. Нами была разработана и построена ЦАЛЗ — быстродействующее счетно-решающее устройство, позволяющее с высокой точностью производить съемку в нужный момент времени при изменении в широких пределах как расстояния до точки съемки, так и скорости ударника. ЦАЛЗ обеспечивает задержку синхронизирующего импульса на время, пропорциональное времени пролета ударником базового расстояния между катушками ЭМИС. Поэтому независимо от скорости ударника синхроимпульс запускает регистрирующую аппаратуру в момент нахождения ударника в заранее заданной точке камеры, которая определяет $f_{\text{н}} = 1-10 \text{ МГц}$. Использование цифровых микросхем для решения этой задачи позволило повысить точность и надежность синхронизации по сравнению с применением аналоговых фантастронных схем [2]. Введение ЦАЛЗ значительно упростило и облегчило работу на установке, позволило фиксировать точку съемки с очень высокой точностью ($\pm 0.3\%$ от расстояния до 2-й катушки ЭМИС) и, кроме того, производить измерения скорости ударника в диапазоне 50—1000 м/с с погрешностью $\pm 0.5\%$. Точность работы ЦАЛЗ хорошо иллюстрирует рис. 4, где приведены первые кадры съемки ударников, летящих с различными скоростями. Видно, что, несмотря на значительные различия скоростей, положения ударников по отношению к реперу (нити отвеса) совпадают с высокой точностью.

Таким образом, на основе стандартных функциональных элементов была разработана и построена установка высокочастотной фотосъемки. Простая в изготовлении и юстировке, установка в то же время обладает высокими оптическими и съемочными характеристиками. Электронные блоки установки, собранные на современной элементной базе, обеспечивают необходимое быстродействие, точность и надежность работы скоростной фотосъемки.

Литература

- [1] Златин Н. А., Мочалов С. М., Пугачев Г. С., Брагов А. М. ЖТФ, 1973, т. 43, № 9, с. 1961—1964.
- [2] Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Под ред. Златина Н. А., Мишина Г. И. М.: Наука, 1974. 344 с.
- [3] Cranq С., Schardin H. Zs. f. Phys., 1929, v. 56, N 3—4, p. 147—183; Витман Ф. Ф., Степанов В. А. В кн.: Некоторые проблемы прочности твердых тел. М.: Изд-во АН СССР, 1959, с. 207—224; Дубовик А. С. Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. М.: Наука, 1984. 320 с.
- [4] Виноградов К. Н., Ульянов Г. К. Акуст. журн., 1959, т. 5, № 3, с. 290—293.
- [5] Пух В. П. Прочность и разрушение стекла. Л.: Наука, 1973. 156 с.
- [6] Импульсные источники света / Под ред. Маршака И. С. М.: Энергия, 1978. 427 с.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
8 апреля 1987 г.