

О. Н. РАЕВ

**ФОРМИРОВАНИЕ
И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ
ИЗОБРАЖЕНИЙ
ПРИ КИНОСЪЁМКЕ**

Чебоксары
АО «ИПК «Чувашия»
2020

УДК 778.5.04.071.5

ББК 37.95

P16

Рецензент: доктор технических наук, профессор
Г. В. Тихомирова

Раев О. Н.

P16 Формирование и преобразование изображений при киносъёмке. — Чебоксары: АО «ИПК «Чувашия», 2020. — 263 с.
ISBN 978-5-86765-580-8

В книге рассмотрены принципы формирования оптических изображений объектов съёмки. Изложены практические выводы из теории преобразований изображений, происходящих в киносъёмочном аппарате. Подробно проанализированы искажения изображений, возникающие при киносъёмке в результате дискретизации изображений по времени, пространственным координатам и по длинам волн света.

Для специалистов, чья профессиональная деятельность связана с записью и преобразованием киноизображений, а также для тех, кто стремится понять особенности технологий киносъёмки и видеосъёмки.

УДК 778.5.04.071.5

ББК 37.95

ISBN 978-5-86765-580-8

© Раев О. Н., 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	9
Список источников по введению	12
Глава 1	
Свет	13
1.1. Свет в кинопроизводстве	15
1.2. Фотоны	16
1.3. Взаимодействие фотонов с веществом	19
1.4. Свет как совокупность фотонов	20
Итоги по главе 1	23
Список источников к главе 1	24
Глава 2	
Понятие о световом поле	26
2.1. Запись светового поля	29
2.1.1. Голографическая технология	30
2.1.2. Интегральная технология	32
2.1.3. Стереоскопическая технология	33
2.1.4. Однообъективная технология	34
Итоги по главе 2	34
Список источников к главе 2	35
Глава 3	
Варианты формирования оптического изображения	37
3.1. Отверстие в непрозрачном экране	37
3.2. Зеркало	43
3.3. Объектив	45
3.3.1. Передача объективом глубины съёмочной сцены	50

3.3.2. Линейная перспектива в пространственном оптическом изображении, формируемом объективом	52
Итоги по главе 3	55
Список источников к главе 3	56

Глава 4

Преобразование трёхмерного оптического изображения в двумерное	57
4.1. Глубина резко изображаемого пространства	60
Итоги по главе 4	62
Список источников к главе 4	63

Глава 5

Основы теории преобразования сигналов изображения при киносъёмке	64
5.1. История создания теории преобразований изображений в кинематографе	64
5.2. Развёртка и дискретизация киноизображения	66
5.3. Сигнал киноизображения	70
5.4. Математические модели преобразования сигнала киноизображения	71
Итоги по главе 5	73
Список источников к главе 5	74

Глава 6

Преобразование двумерного оптического изображения в дискретные сигналы изображения	76
Итоги по главе 6	80
Список источников к главе 6	81

Глава 7

Преобразование дискретных сигналов изображения в цифровые сигналы изображения	82
Итоги по главе 7	88
Список источников к главе 7	88

Глава 8

Частотные характеристики изображений и их преобразование при киносъёмке	89
8.1. Частотные характеристики кинематографической системы	89
8.2. Преобразование сигнала при его дискретизации	94
8.3. Искажения сигнала, возникающие при его дискретизации	97
Итоги по главе 8	102
Список источников к главе 8	103

Глава 9

Временные искажения киноизображения при его дискретизации по времени	104
9.1. Характеристики дискретизации киноизображения по времени	106
9.1.1. Частота киносъёмки	106
9.1.2. Время экспонирования	110
9.1.3. Временная частотная характеристика обтюлятора	112
9.2. Неравномерность яркости объектов киносъёмки	114
9.3. Безинерционные источники света	116
9.4. Освещение объектов киносъёмки импульсными источниками света	119
9.5. Киносъёмка цифровых телевизионных изображений	120
9.5.1. Киносъёмка интерьера с работающим жидкокристаллическим экраном	121
9.5.2. Киносъёмка интерьера с работающим плазменным экраном	123
9.5.3. Киносъёмка интерьера с работающим светодиодным экраном	125
9.5.4. Цифровые телевизионные приёмники с режимом «100 Гц»	126

9.6. Киносъёмка экрана компьютерного монитора	126
9.7. Киносъёмка интерьера с несколькими работающими компьютерными мониторами	128
Итоги по главе 9	129
Список источников к главе 9	131

Глава 10

Пространственные искажения киноизображения при его дискретизации по пространственным координатам	133
10.1. Характеристики дискретизации киноизображения по пространственным координатам	135
10.1.1. Апертура фотодиода в светочувствительном слое матрицы	135
10.1.2. Пространственная частотная характеристика матрицы	136
10.1.3. Разрешающая способность при цифровой киносъёмке	139
10.1.4. Частота дискретизации киноизображения по пространственным координатам	144
10.2. Границы в изображениях объектов съёмки	145
10.3. Киносъёмка объектов с периодическим изменением яркости вдоль горизонтальной или вертикальной оси светочувствительной матрицы	146
10.4. Киносъёмка объектов с периодическим	152
изменением яркости в произвольном направлении	
10.4.1. Пространственная частота изображения меньше половины частоты пространственной дискретизации	154
10.4.2. Пространственная частота изображения равна половине частоты пространственной дискретизации	155

10.4.3. Пространственная частота изображения больше половины частоты пространственной дискретизации	157
10.4.4. Объёмные объекты с пространственным периодическим изменением яркости	161
Итоги по главе 10	164
Список источников к главе 10	166

Глава 11

Пространственно-временные искажения киноизображения	169
11.1. Киносъёмка объектов, совершающих периодическое движение	170
11.2. Киносъёмка в движении объектов с периодической пространственной структурой	174
11.3. Киносъёмка движущегося автомобиля	176
11.4. Киносъёмка интерьера с работающим вентилятором	189
11.5. Киносъёмка интерьера с работающим телевизором на базе электронно-лучевой трубки . . .	192
11.5.1. Частота киносъёмки 24 кадр/с	195
11.5.2. Частота киносъёмки 25 кадр/с	198
11.5.3. Телевидение высокой чёткости	199
11.6. Рассогласование времени экспонирования по полю кадра	200
Итоги по главе 11	203
Список источников к главе 11	206

Глава 12

Цветовые искажения киноизображения	208
12.1. Понятие о цвете	210
12.2. Запись и воспроизведение цвета в кинематографе . . .	216
12.3. Управление цветом в кинематографе	219
Итоги по главе 12	221
Список источников к главе 12	222

Приложение 1

Приоритет открытий	224
1. Михаил Васильевич Ломоносов	225
2. Владимир Александрович Котельников	226
Список источников к приложению 1	228

Приложение 2

Термин «частотная характеристика»	229
Список источников к приложению 2	231
Заключение	232
Терминологический словарь	234
Общий список источников	253

ВВЕДЕНИЕ

В XXI веке кинотехника кардинально изменилась, существенно расширилось разнообразие техники и её функциональные возможности. Плёночные кинотехнологии сменились цифровыми. Непрерывно разрабатываемые и улучшаемые программные продукты стали инструментами, позволяющими создавать и обрабатывать киноизображения на компьютере, что позволило переместить многие операции со съёмочного периода фильмопроизводства на послесъёмочный период (часто называемый постпродакшен).

Переход от плёночных технологий к цифровым в фильмопроизводстве завершился. Даже самые консервативные скептики признали неоспоримые преимущества и существенно более широкие возможности, предоставляемые цифровыми технологиями.

Прогнозируя дальнейшее развитие цифровых технологий, можно с уверенностью предсказать появление в ближайшее время таких технологий, которые полностью изменят наше представление о фильмопроизводстве (см. об этом, например, в [1]).

В условиях быстро происходящих масштабных изменений технологий фильмопроизводства необходимо непрерывно оценивать их перспективы и оперативно внедрять те технологии, которые обеспечат существенные преимущества сейчас и в будущем. А для этого необходима система подготовки специалистов, соответствующая современному уровню развития цифровых технологий фильмопроизводства. Только такие специ-

алисты смогут обеспечить успешное будущее отечественного кинематографа. Поэтому необходимо оперативно реагировать и отвечать на вопросы: как, чему и с какой глубиной знаний готовить будущих специалистов нового кинематографа, в том числе находить оптимальное соотношение между шириной и глубиной преподаваемых им знаний [2].

Если принять точку зрения, что кинематографическим вузам следует учить студентов только творчеству, то технику студенты будут знать исключительно с позиций пользователя (потребителя). В результате, например, будущие кинооператоры, получающие только гуманитарное образование, вынуждены будут передавать функции технической реализации собственных и режиссёрских творческих замыслов техническим специалистам, сопровождающим используемые в съёмочном и послесъёмочном периоде технические и программные средства. Но даже в этом случае кинооператор должен знать возможности, ограничения и принципы работы технических средств. К тому же, остаются открытыми вопросы, а кто и чему будет обучать технических специалистов, задействованных в кинопроизводстве?

Кроме того, существуют виды кинематографа, например, авторское и документальное кино, бюджеты которых не позволяют привлекать в съёмочные группы большое количество разных специалистов. Для успешной деятельности таких видов кинематографа необходимы специалисты, обладающие широким кругозором и одновременно глубокими, фундаментальными знаниями, в том числе техническими знаниями.

Другая сложность организации образовательного процесса подготовки киноспециалистов — это существенный разброс в уровнях знаний, навыков и умений поступающих в творческие киновузы. В большинстве своём поступающие даже на специальность «кинооператор» — это гуманитарии, которые часто не знают математики и физики, и в творческих вузах этому не учат, да и технике и технологиям учат только с позиций потребителей этой техники. А среди студентов всегда есть такие, кто уже имеет специальное профессиональное образование или первое высшее образование, в том числе те, у кого

первое специальное или высшее образование — техническое. При таком разбросе начальных знаний всегда будут студенты, которые не воспринимают технические сведения, и будут студенты, которые будут не удовлетворены низким уровнем изложения материала по кинотехнике и кинотехнологиям. Поэтому, ориентируясь на средний уровень подготовки студентов, всё же необходимо создавать условия, при которых у студентов будут возможности более глубокого изучения материала по сравнению с базовым уровнем.

Автор книги уверен, что базовые знания о кинотехнологиях и принципах работы кинотехники нужны всем кинематографистам, тем более что быстро происходящие масштабные изменения в кинотехнике и в кинотехнологиях направлены исключительно на расширение возможностей реализации творческих замыслов создателей кинофильмов, на усиление воздействия кинопроизведений на зрителей.

При этом основа кинопроизводства — создание киноизображений (независимо от вида используемых технических средств) для дальнейшей демонстрации кинофильмов с помощью различных аудиовизуальных технических средств — не меняется. Поэтому так важны публикации, освещающие теорию формирования и преобразований киноизображений, а также практические рекомендации по работе с кинотехникой.

Основная цель данной книги — познакомить читателей с причинами появления искажений киноизображения при киносъёмке и рекомендациями по их уменьшению или устранению. Кинематографисты, вооружённые знаниями принципов записи и преобразований киноизображений, способны:

- максимально использовать возможности, предоставляемые кинотехникой, для реализации своих творческих замыслов;
- освоить навыки грамотного выполнения киносъёмки;
- предупреждать появление нежелательных искажений киноизображения, возникающих при киносъёмке.

Книга предназначена для кинематографистов, в большинстве своём гуманитариев, поэтому содержание книги изложено в форме, доступной для широкого круга читателей.

Современный специалист не сможет стать успешным профессионалом в кинематографической отрасли, если он не обладает знаниями возможностей и ограничений кинотехнических технологий, если он не пополняет регулярно свои знания. Только специалисты, вооруженные знаниями, в состоянии решать любые конкретные практические задачи, стоящие перед ними.

Автор выражает глубокую благодарность рецензенту Галине Вениаминовне Тихомировой за ценные предложения и замечания, позволившие улучшить качество книги.

Автор искренне благодарит Галину Ивановну Рожкову и Михаила Анатольевича Пронина, которые способствовали совершенствованию книги своей поддержкой, советами, рекомендациями и замечаниями на разных стадиях подготовки книги.

Автор благодарит всех организаторов и участников ежегодной научно-практической конференции «Запись и воспроизведение объёмных изображений в кинематографе и других областях» и ежегодной научно-практической конференции «Инновационные технологии в кинематографе и образовании», общение с которыми сподвигло автора на создание данной книги. Именно коллективная плодотворная работа всех участников конференций способствует научной деятельности в современной отечественной кинотехнической отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ПО ВВЕДЕНИЮ

1. *Березин О. С.* Российская киноиндустрия 4.0 — цифровые кинофабрики или прогнозирование за гранью понимания // Инновационные технологии в кинематографе и образовании : IV Международная научно-практическая конференция, Москва, 26–29 сентября 2017 г. : Материалы и доклады / под общей ред. О. Н. Раева. Москва : ВГИК, 2017. С. 9–33.

2. *Агранович М. Л., Раев О. Н.* Этапы развития образовательного процесса подготовки кинооператоров // Инновационные технологии в кинематографе и образовании : III Международная научно-практическая конференция, Москва, 28–30 сентября 2016 г. : Материалы и доклады. Москва : ВГИК, 2016. С. 212–218.

Глава 1

СВЕТ

Свет — один из основных элементов мироздания. Свет непрерывно в громадном количестве излучается звёздами, в том числе ближайшей к нам звездой — Солнцем, и распространяется от них во все стороны. Часть света, разлетающегося от Солнца, в процессе своего движения пересекается с Землёй, которая как бы «купается» в падающем на неё, постоянно обновляющемся, всё заполняющем световом потоке.

Свет является неотъемлемым элементом существования Земли, непосредственно влияющим на её эволюцию, на изменения, происходящие со всем, что есть на Земле.

Люди осознали значение света уже в глубокой древности. Например, согласно Библии [1; 1:3–5], Бог создал свет уже в первый день сотворения мира:

«И сказал Бог: да будет свет. И стал свет.

И увидел Бог свет, что он хорош, и отделил Бог свет от тьмы.

И назвал Бог свет днём, а тьму ночью. И был вечер, и было утро: день один».

Если бы не было света, то на Земле не зародилась бы органическая жизнь и не появился бы человек. В Евангелии от Иоанна сказано: «... и жизнь была свет человеков» [2; 1:4].

Свет обладает следующими свойствами:

— распространяется прямолинейно с очень большой скоростью;

— свет по-разному взаимодействует с разными объектами (прежде всего, это разные количественные, пространственные

и спектральные характеристики отражения и поглощения света у разных объектов);

— в конечном итоге свет поглощается веществом;

— свет непрерывно обновляется, так как он непрерывно излучается источниками света.

Благодаря этим свойствам свет после взаимодействия с вещественными объектами становится носителем информации о результатах этого взаимодействия, а следовательно, и о самих объектах. Получение и обработка этой информации позволяет живым существам выстраивать своё субъективное представление об окружающих их объектах.

Человек живёт всю жизнь со светом и настолько привыкает к нему, что в повседневной жизни не задумывается о значении света. Свет для человека становится чем-то обыденным, привычным, неотъемлемым. В повседневной жизни он использует слово «свет» для отражения получаемого на основании зрительных ощущений результата выстраивания в его сознании представления о состоянии соотношения «темно — светло» и о субъективно воспринимаемом количестве света от всех объектов, находящихся в его поле зрения. Когда человек хочет выразить суммарно воспринимаемое им количество света, он говорит: «светло», «сумрачно», «темно». Например, «светлым-светло», «уж в комнате светло», «Когда прозрачно и светло / Ночное небо над Невою...» [3].

Поскольку свет излучается источниками света, то слово «свет» применяется как указание на источник света или связывается непосредственно с источником света — «Светил небесных дивный хор / Течёт так тихо, так согласно...» [3], «...Я проезжал верхом при лунном свете...» [4].

В нашей речи слово «свет» часто используется как характеристика изменения количества света (например: «зажечь в комнате свет», «подсветить») или для указания направления на ту часть пространства, где светло (например: «повернуться к свету»).

Слово «свет» может применяться для обозначения всей земли и всего, что на ней находится, — «Мы объехали весь

свет...» [5], «...Забыв на время всё на свете» [3]. Но может, наоборот, ограничивать, выделять что-либо. Например, «в свете теории зрительного восприятия». Другой пример — указание на круг людей, составляющих высший слой привилегированных классов, — «Не мысля гордый свет забавить...» [3].

Слово «свет» может использоваться и в переносном значении — «лицо светится», «свет истины», «свет очей» и т. д. Например, «В её улыбке — солнца свет» [6].

После изобретения фотографии в русском языке слово «свет», как составной терминологический элемент, вошло в термин «светопись», поэтично и в то же время по существу отражающий суть технологии получения фотографии. Но, к сожалению, сегодня термин «светопись» вытеснен термином «фотография».

1.1. СВЕТ В ФИЛЬМОПРОИЗВОДСТВЕ

При рассмотрении технологий киносъёмки важны другие определения термина «свет», связанные, в первую очередь, с физической сущностью света. Рассмотрим эти определения.

В оптике (см., например, [7]) под термином «свет» принято понимать три вида оптического излучения: ультрафиолетовое, видимое человеком и инфракрасное. Такое применение термина «свет», при котором к свету причисляется излучение, как воспринимаемое, так и не воспринимаемое глазами человека, основано на общности физических процессов, характеризующих излучения этих трёх видов, что позволило построить и на практике применять для этих видов излучения единую теорию оптических систем.

Кинотехнологии (если не рассматривать специальные виды киносъёмки, например киносъёмку в инфракрасном свете) построены на записи, преобразовании и воспроизведении электромагнитных излучений, воспринимаемых глазом человека, иными словами, на видимом излучении. Поэтому примем следующее определение: «Свет, в узком смысле, то же, что и видимое излучение, т. е. электромагнитные волны в интервале частот, воспринимаемых человеческим глазом ($7,5 \cdot 10^{14} - 4,3 \cdot 10^{14}$ Гц), что соответствует длинам волн в вакууме от 400 до 700 нм» [8].

Однако введём в приведённое определение небольшую, но принципиальную поправку: свет — это не электромагнитные волны, а электромагнитная энергия, излучаемая в виде отдельных фотонов с указанными в определении характеристиками.

Отметим также, что границы частот и длин волн видимого диапазона электромагнитного излучения в разных источниках разные и могут отличаться от значений, приведённых выше. Эти расхождения объясняются:

- низкой чувствительностью фоторецепторов сетчатки глаза к фотонам, частоты которых близки к границам чувствительности фоторецепторов сетчатки;
- индивидуальными различиями зрения у людей;
- различиями в условиях и методиках проведения исследований зрения.

1.2. ФОТОНЫ

Свет излучается источниками света естественного происхождения, среди которых основным является Солнце, и источниками света искусственного происхождения, созданными человеком.

Электромагнитная энергия излучается источниками света отдельными порциями — квантами. Если частота электромагнитных колебаний кванта соответствует диапазону частот видимого излучения, то такие кванты называют фотонами.

Каждый фотон движется в световом потоке независимо от других фотонов прямолинейно с громадной скоростью. В вакууме скорость движения фотонов, т. е. скорость света, составляет $c_0 = 299792,5$ км/с [6]. В любом прозрачном для света веществе скорость фотонов меньше:

$$c = \frac{c_0}{n}, \quad (1.1)$$

где c — скорость движения фотона в прозрачной для света среде, n — показатель преломления среды, в которой движется фотон.

Показатель преломления воздуха равен 1,000292 [7], поэтому скорость света в воздухе почти такая же, как в вакууме.

В других оптически прозрачных средах показатель преломления больше. Например, показатель преломления воды равен 1,33, а алмаза — 2,42 [9], т. е. в воде свет распространяется в 1,33 раза медленнее, чем в воздухе, а в алмазе — в 2,42 раза медленнее.

Каждый фотон это определённое, неизменное количество электромагнитной энергии W , которая однозначно связана с частотой ν колебаний электрической напряжённости и магнитной напряжённости в фотоне:

$$W = h\nu, \quad (1.2)$$

где h — константа, называемая постоянной Планка*, равная по современным данным $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с [10].

Формула (1.2) характеризует двойственную природу света: корпускулярную (фотон — неделимый минимальный элемент электромагнитной энергии; величина электромагнитной энергии фотона неизменна в течение всего времени существования фотона) и волновую (электрическая и магнитная напряжённости в фотоне изменяются по гармоническому закону с постоянной частотой ν).

Векторы электрической напряжённости и магнитной напряжённости в фотоне находятся во взаимно перпендикулярных плоскостях с одинаковыми фазами, при этом оба вектора перпендикулярны направлению прямолинейного движения фотона. Поэтому каждый фотон можно характеризовать пространственной ориентацией плоскости колебаний электрической напряжённости, называемой плоскостью поляризации.

В большинстве световых потоков плоскости поляризации фотонов, составляющих световой поток, имеют разную пространственную ориентацию, в результате чего совокупный

* Макс Планк (23 апреля 1858 года — 4 октября 1947 года) — немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики, лауреат Нобелевской премии по физике 1918 года.

Крупнейшие научные достижения Макса Планка, оказавшие существенное влияние на развитие мировой науки, относятся к термодинамике, теории теплового излучения, квантовой теории, специальной теории относительности, оптике.

световой поток, состоящий из таких фотонов, характеризуется отсутствием поляризации света. Если же бóльшая часть фотонов или все фотоны, составляющие световой поток, будут иметь одинаковую плоскость поляризации, то и световой поток, из этих фотонов состоящий, будет поляризованным.

Зная частоту электромагнитных колебаний ν , можно определить период T их колебаний:

$$T = \frac{1}{\nu}. \quad (1.3)$$

Поскольку в любом оптически прозрачном веществе, в том числе в вакууме, фотоны двигаются с постоянной скоростью, то за время T , равное периоду колебаний, они пролетят путь, который называется длиной волны света λ . Иными словами, за одно колебание электромагнитной энергии фотон переместится в пространстве на расстояние λ , или гармонические изменения электрической напряжённости и магнитной напряжённости в фотоне будут соответствовать одному периоду T при перемещении фотона на расстояние λ .

Поэтому длина волны λ_0 электромагнитных колебаний фотона в вакууме равна:

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{\nu}. \quad (1.4)$$

Поскольку, как сказано выше, скорость света в разных оптических средах разная и всегда меньше скорости света в вакууме, то длина волны λ электромагнитных колебаний фотона в разных средах (в разном веществе, прозрачном для света), в которых движется фотон, будет разной и всегда меньше длины волны того же фотона при его движении в вакууме:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}. \quad (1.5)$$

Итак, каждый фотон, как самостоятельный и неделимый элемент света, характеризуется величиной электромагнитной энергии, направлением движения в пространстве, а также пространственной ориентацией плоскости поляризации. Величина

энергии фотона однозначно связана с частотой электромагнитных колебаний. Кроме того, каждый фотон дополнительно может быть описан двумя производными характеристиками, зависящими от свойств среды, в которой фотон движется: скоростью движения фотона и длиной волны электромагнитных колебаний.

1.3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФОТОНОВ С ВЕЩЕСТВОМ

Рассмотрим, что происходит со светом, например, излучаемым настольной лампой, когда свет, представляющий собой совокупность громадного количества фотонов, непрерывно излучаемых лампой, проходит в воздухе и достигает поверхности письменного стола и всех предметов, лежащих на столе.

Фотон при взаимодействии с веществом может быть поглощён одним из атомов этого вещества, в результате чего фотон, как независимый элемент электромагнитной энергии, перестаёт существовать. При поглощении фотона его электромагнитная энергия передаётся атому и может привести к структурным изменениям состояния атома (появлению в веществе свободного электрона, вышедшего за пределы его первоначальной орбиты в атоме).

После излучения источником света каждый фотон движется прямолинейно, пока вещество (среда), в котором он движется, (например, воздух) не закончится и на пути фотона не появится другое вещество. Результатом взаимодействия фотона со вторым веществом может быть, кроме поглощения фотона, его отражение от второго вещества обратно в первое вещество, но в другом направлении, или преломление, когда фотон продолжит своё движение во втором веществе (во второй среде), изменив направление своего движения.

Что именно произойдёт с фотоном на границе двух веществ (отражение или преломление) зависит как от физических свойств обоих веществ, так и от величины электромагнитной энергии фотона или от его частоты (как параметра, однозначно связанного с величиной энергии фотона), а также от угла между направлением движения фотона и поверхностью вто-

рого вещества в пределах участка взаимодействия фотона со вторым веществом.

В случае отражения или преломления света фотоны продолжают своё прямолинейное движение в новых направлениях до тех пор, пока на их пути не встретится новая граница между двумя разными веществами, где снова каждый фотон либо отразится от новой границы двух веществ, либо продолжит своё движение в новом веществе в новом направлении. При этом в каждом из веществ возможно поглощение фотона.

Движение каждого фотона будет продолжаться до тех пор, пока фотон не поглотится каким-либо веществом. Такова судьба всех фотонов — через какое-то время они все будут поглощены тем или иным веществом. Но источник света непрерывно излучает всё новые и новые фотоны, которые заполняют пространство вокруг нас. А поскольку глаза человека не способны зарегистрировать столь быстро протекающие процессы, то в представлении человека световой поток от источников света это нечто непрерывное и неизменное — свет обеспечивает неизменную освещённость всех наблюдаемых человеком объектов, если яркость источников света постоянна.

1.4. СВЕТ КАК СОВОКУПНОСТЬ ФОТОНОВ

Скорость движения фотонов настолько велика, что в воздухе 1 метр они пролетают за $3,3 \cdot 10^{-9}$ секунды (за несколько наносекунд).

Зрение же человека может зарегистрировать только такие изменения во времени, частота которых не превышает 43 Гц (критическая частота слияния мельканий равна 43 Гц) [11]. Поэтому любые световые изменения во времени, происходящие быстрее, чем за 0,023 секунды, человек просто не воспринимает, а фотоны за это время успевают пролететь почти 7 000 километров!

Отметим, что значения критической частоты слияния мельканий у разных людей разная и зависит даже у одного человека от многих факторов: яркости, длины волны света и размера мелькающего светового пятна, положения изображения

мелькающего светового пятна на сетчатке, наличия побочных раздражителей, возраста и самочувствия человека и т. д. [12].

Учитывая, с одной стороны, громадные скорости движения фотонов, а с другой — непрерывность излучения источниками света громадного количества новых фотонов, в большинстве практических применений допустимо не рассматривать отдельные фотоны или их совокупности, а рассматривать свет как единую световую субстанцию — световое поле. Именно в этом смысле используются термины «светопись», «световая картина» и т. д.

В такой модели света основным параметром является световой поток, характеризующий мощность видимого излучения. Световой поток измеряется в люменах (лм).

Для описания светового потока, излучаемого источником света в каком-либо направлении, введена сила света, определяющая пространственную плотность светового потока. Сила света измеряется в канделах (кд).

Когда свет, излучённый источниками света, достигает объектов, он освещает их, т. е. создаёт освещённость поверхностей объектов. Освещённость представляет собой поверхностную плотность светового потока на освещаемой поверхности. Единицу измерения освещённости называют люксом (лк). Например, освещённость поверхности земли солнечным светом в яркий безоблачный день достигает до 100 000 лк. Если погода пасмурная, то освещённость снижается более чем в 10 раз — до 2 000–10 000 лк. Освещённость в помещениях составляет около 300–500 лк. Лунный свет при полной луне даёт на поверхности земли освещённость в 0,1 лк [13].

Если источник света излучает свет равномерно во все стороны, то освещённость объектов этим источником уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от источника света до освещаемых им объектов, т. е. освещённость объекта быстро уменьшается при удалении источника света от освещаемого им объекта.

Когда свет попадает на объекты, он, как сказано выше, частично отражается от каждого объекта, частично прелом-

ляется и проходит сквозь объект (если вещество объекта прозрачно для света), частично поглощается каждым объектом. При этом каждый объект отражает свет в разном количестве в разных направлениях и, кроме того, по-разному отражает составляющие света, характеризующиеся разными частотами его электромагнитных колебаний.

Количество отражаемого света определяется коэффициентом отражения поверхности объекта. Чем больше коэффициент отражения, тем больше света отражается от объекта, и наоборот, чем меньше коэффициент отражения, тем в большей степени свет поглощается объектом или проходит сквозь него.

Поверхность объекта может быть зеркальной (оптически гладкая поверхность) или шероховатой (диффузно отражающая поверхность).

Зеркальные поверхности характеризуются направленным, зеркальным отражением света, когда угол падения света на поверхность объекта равен углу его отражения.

Диффузно отражающая поверхность объекта отражает свет во всех направлениях.

Многие поверхности объектов (например, лакированная поверхность мебели) обладают зеркально-диффузным отражением, при котором большая часть света отражается по закону зеркального отражения, а остальная часть света — во всех остальных направлениях.

Коэффициенты отражения поверхностей объектов зависят от частоты света (длины волны света). Например, у золота коэффициент отражения света с длиной волны 420 нм составляет 29,3%; с длиной волны 550 нм — 74%, а с длиной волны 650 нм — 88,9% [14].

Поэтому при освещении объектов светом с разным спектральным составом человек воспринимает разный цвет этих объектов. Например, если предмет из золота осветить белым светом, то составляющие света с разными длинами волн отразятся от золотого изделия в разном количестве. Цвет света, отражённого изделием из золота, человек воспринимает как «золотой». Но если то же самое золотое изделие осветить,

например, светом синего цвета, то человек увидит изделие тёмно-синим, а после очень длительной адаптации — ахроматическим (тёмно-серым или чёрным).

Поскольку объекты частично отражают падающий на них свет, то они становятся вторичными источниками света, поэтому можно говорить о яркости отражённого от них света. Яркость в каком-либо направлении это отношение силы света в данном направлении к площади проекции участка излучающей поверхности на плоскость, перпендикулярную этому направлению. Яркость измеряется в $\text{кд}/\text{м}^2$. Например, согласно ГОСТу Р 52870-2007 яркость киноэкрана в кинозале должна составлять $48 \pm 10,2 \text{ кд}/\text{м}^2$ [15].

Если поверхность объекта характеризуется зеркально-диффузным отражением света, то яркость такого объекта зависит от угла, под которым объект рассматривается или под которым измеряется яркость.

Отражённый от каждого объекта свет попадает на другие объекты или на другие части этого же объекта. Таким образом, на любой участок любого объекта приходит прямой свет от источников света и отражённый свет от других объектов и других участков этого же объекта. Освещённость любого участка любого объекта складывается из света, приходящего к нему со всех сторон, в результате могут возникнуть световые блики, обусловленные зеркальной компонентой индикатрисы рассеяния света (угловое распределение интенсивности отражённого света), рефлекс (отсветы, попадающие на соседние объекты от рассеивающих свет поверхностей) и авторефлексы (многократные отражения света в складках и углублениях на поверхности объекта).

ИТОГИ ПО ГЛАВЕ 1

1. Свет представляет собой совокупность огромного количества независимых фотонов, распространяющихся с одинаковой скоростью в оптически прозрачной однородной среде, двигающихся прямолинейно каждый в своём направлении, пока на их пути не появится новое оптически прозрачное вещество

с другим показателем преломления света или вещество, непрозрачное для света.

2. На границе между двумя оптически прозрачными однородными веществами с разными показателями преломления света фотон может отразиться от второго вещества и продолжить своё движение в первом веществе, но уже в другом направлении. Возможно, что фотон продолжит своё прямолинейное движение во втором веществе, изменив направление движения.

3. При прохождении фотона через любое вещество фотон может быть поглощён этим веществом.

4. Фотон это неизменная во времени порция электромагнитной энергии, частота колебаний электрической напряжённости и магнитной напряжённости которой находится в интервале частот от $7,5 \cdot 10^{14}$ до $4,3 \cdot 10^{14}$ Гц, что соответствует длинам волн в вакууме от 400 до 700 нм.

5. При анализе формирования и преобразований изображения в большинстве практических задач часто свет допустимо рассматривать не как совокупность отдельных фотонов, а как световые потоки, как единую световую субстанцию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ К ГЛАВЕ 1

1. Библия. Ветхий Завет. Книга Бытие [Электронный ресурс] // библиотека «Святоотеческое наследие» : сайт. <http://www.biblioteka3.ru/biblioteka/biblija/bytie/txt01.html> (дата обращения 08.07.2020).

2. Библия. Евангелие от Иоанна [Электронный ресурс] // библиотека «Святоотеческое наследие» : http://www.biblioteka3.ru/biblioteka/biblija/ev_ioann/txt01.html (дата обращения 08.07.2020).

3. Пушкин А. С. Евгений Онегин : роман в стихах. Москва : Российская государственная библиотека, 2010. 228 с.

4. Пушкин А. С. Вновь я посетил... // Собрание сочинений : в 10 т. Т. 2. Стихотворения 1825–1836. Москва : Современник, 1982. С. 443.

5. Пушкин А. С. Сказка о царе Салтане, о сыне его, славном и могучем богатыре, князе Гвидоне, и о прекрасной царевне

Лебеди / рис. С. [В.] Малютина. Москва : А. И. Мамонтов, 1898. 32 с.

6. *Ростан Э.* Сирано де Бержерак / пер. с фр. Т. Щепкиной-Куперник. Москва : Эксмо, 2007. 733 с.

7. Оптические приборы в машиностроении. Справочник. Москва : Машиностроение, 1974. 238 с.

8. *Гагарин А. П.* Свет // Большая советская энциклопедия. 1976. Том 23. С. 61. Ст. 170.

9. *Шаронов В. В.* Свет и цвет. Москва : Физико-математическая литература, 1961. 311 с.

10. *Haddad D., Seifert F., Chao L. S., Possolo A., Newell D. B., Pratt J. R., Williams C. J., Schlamminger S.* Measurement of the Planck constant at the National Institute of Standards and Technology from 2015 to 2017 // *Metrologia*. 2017. No 54. P. 633–641. DOI 10.1088/1681-7575/aa7bf2.

11. *Роженцов В. В.* Точность измерения критической частоты световых мельканий // *Офтальмология*. 2013. Т. 10. № 1. С. 47–49.

12. *Рожкова Г. И., Матвеев С. Г.* Зрение детей : проблема оценки и функциональной коррекции. Москва : Наука, 2007. 315 с.

13. *Бермингэм А.* Освещение на телевидении / пер. с англ. Е. Г. Шматрикова ; под ред. В. Г. Маковеева. Москва : ГИТР, 2006. 335 с.

14. *Луизов А. В.* Глаз и свет. Ленинград : Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1983. 144 с

15. ГОСТ Р 52870-2007. Средства отображения информации коллективного пользования. Требования к визуальному отображению информации и способы измерения [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200065030> (дата обращения: 12.03.2020).

Глава 2

ПОНЯТИЕ О СВЕТОВОМ ПОЛЕ

Основоположником научно обоснованной теории светового поля является выдающийся советский учёный А. А. Гершун*. Согласно этой теории под световым полем понимается любая область пространства, изучаемая с точки зрения прохождения в ней световых потоков [1, 2]. Свет с момента его излучения до момента его поглощения распространяется в среде рассматриваемой области пространства с громадной, но всё-таки конечной скоростью. Следовательно, каждый элемент объёма этого пространства содержит некоторое количество света, которому приписывается вектор плотности светового потока.

Такой подход позволяет выполнять теоретический анализ светового поля и применять приложения теории светового поля при решении практических задач, связанных со светом, в различных технических отраслях, в том числе в фотометрии**, например, при проектировании оптимальных осветительных систем в помещениях зданий и сооружений, когда требуется предварительный теоретический расчёт освещённости в любых областях ограниченного пространства, т. е. в разных местах конкретных проектируемых помещений (см. например, [3]).

* Гершун Андрей Александрович (22 (9) октября 1903 года — 6 декабря 1952 года) — советский учёный в области фотометрии и светотехники. Основатель научной школы по гидрооптике в Государственном оптическом институте. Автор общей теории светового поля, ключевые моменты которой он изложил в монографии «Световое поле», изданной в СССР в 1936 году [1] и в США в 1939 году.

** Фотометрия — это научное направление физики и отрасль техники, специализирующиеся на измерениях света.

Итак, световое поле представляет собой совокупное распределение световых потоков, излучаемых источниками света и отражаемых всеми участками всех объектов во всех возможных пространственных направлениях.

Записать, зафиксировать измерительными или регистрирующими приборами световое поле целиком невозможно. Более того, добавление измерительных или регистрирующих приборов в пространство светового поля автоматически изменяет это поле. В каждый момент времени параметры светового поля можно измерить только в одной точке пространства. Проще зафиксировать исходные параметры первичных световых потоков, исходящих от источников света, и вторичных, возникающих в результате отражения света от освещаемых объектов.

К исходным параметрам стационарных световых потоков относятся:

- яркость всех участков источников света, в общем случае разная в разных направлениях;
- спектральный состав света, излучаемого источниками света;
- поляризация излучаемого света;
- пространственные координаты расположения всех объектов, включая источники света;
- формы всех объектов;
- коэффициенты отражения света поверхностей освещаемых объектов, зависящие от угла падения на них света, материала объектов и от длины волны падающего на них света.

Яркость и спектральный состав света, излучаемого источниками света, могут изменяться с течением времени, а объекты могут перемещаться в пространстве относительно друг друга и изменять свою форму. Поэтому в общем случае пространственные координаты объектов, в том числе источников света, и их форма, а также яркость и спектральный состав излучаемого света зависят от времени.

Знание исходных параметров необходимо для выполнения теоретического описания и расчётов формируемого светового поля в конкретных задачах.

С целью упрощения расчётов обычно вводятся различные допущения, которые несущественно влияют на конечный результат расчётов. Например, рассматриваются только стационарные (не изменяющиеся во времени) световые потоки или принимается, что поверхности однородных тел отражают свет с одинаковой яркостью во всех направлениях в соответствии с законом Ламберта* [4].

Применение в кинематографе технологий записи всего светового поля на съёмочном этапе фильмопроизводства в настоящее время технически нереализуемо и не является необходимостью, поскольку в конечном итоге в каждом кадре в каждый момент времени записывается только часть, фрагмент снимаемой сцены или объекта съёмки. Взгляд на объекты киносъёмки только с одного ракурса позволяет создавать кинофильмы, в которых их авторы могут техническими средствами однозначно отображать свои мысли и чувства или информацию, предназначенные для передачи зрителям. Воспримет ли зритель то, что хотели донести до него создатели кинофильма, будет зависеть не только от технических средств кинопоказа, но прежде всего от знаний, умений и навыков создателей кинофильма и применённых ими творческих приёмов.

Однако возможность записи на съёмочных площадках световых полей будущих монтажных кадров представляется заманчивой, поскольку тогда всю главную работу над каждым монтажным кадром можно будет выполнять в послесъёмочный период фильмопроизводства.

Сегодня развитие технологий направлено, прежде всего, на создание и совершенствование компьютерного моделирования сцен, при котором не только формируются образы объектов и их пространственное расположение относительно друг друга,

* Ламберт Иоганн Генрих (26 августа 1728 года — 25 сентября 1777 года) — швейцарский учёный в области математики, физики (в том числе оптики), философии, астрономии, картографии.

Согласно закону Ламберта, установленному им экспериментально в 1760 году, яркость света, отражённого от диффузной поверхности, одинакова во всех направлениях.

но и моделируется расчётное световое поле, создаваемое с помощью математических алгоритмов с той или иной степенью приближения к реальности. Эти технологии сегодня нашли широкое применение в компьютерной анимации.

Будущее развитие кинотехнологий может пойти по двум вариантам:

— совершенствование технологий записи светового поля съёмочных сцен, что позволит перенести большинство функций операторской работы со съёмочного периода фильмопроизводства на послесъёмочный период;

— совершенствование компьютерных технологий создания и моделирование изображений объектов и светового поля в сцене, создаваемой программными средствами, до такого уровня точности, при котором зритель не будет видеть разницы между изображениями объектов и актёров, полученными в результате киносъёмки, и изображениями, смоделированными на компьютере, что позволит полностью отказаться от киносъёмки [5].

Любой из этих двух вариантов развития кинотехнологий приведёт к революционному преобразованию всего кинематографа в ближайшем будущем.

2.1. ЗАПИСЬ СВЕТОВОГО ПОЛЯ

Рассмотрим возможные технологии записи светового поля в контексте потребностей кинематографа.

Как уже сказано выше, в настоящее время запись всего светового поля невозможна, да и не нужна. Достаточно записывать световые потоки, приходящие со всех сторон в небольшую зону пространства. Такая запись, с одной стороны, сегодня технически реализуема, а с другой — позволяет работать с содержанием кадра в последующем процессе компьютерной обработки, реализуя следующие основные функции:

- выстраивать изображение с позиции нужного ракурса;
- задавать объект, который будет изображён с максимальной резкостью;
- изменять изображение, как если бы при киносъёмке изменялись фокусное расстояние объектива и апертура объектива;

- создавать из записанного светового поля стереоизображения;
- проводить другие творческие изменения в киноизображении, в том числе добавлять визуальные эффекты.

2.1.1. Голографическая технология

Один из перспективных способов записи светового поля основан на принципах голографической записи и воспроизведения изображений.

На рис. 2.1 приведена схема получения отражательной голограммы, предложенная Ю. Н. Денисюком, которая получила широкое практическое применение в изобразительной голографии [6].

Голограмма образуется следующим образом. Пучок когерентного света (монохроматическое излучение с временной и пространственной упорядоченностью), излучаемый лазером 1, расширяется линзой 2 и проходит через светочувствительный слой 3, освещая снимаемый объект 4. Свет, отражённый от снимаемого объекта 4, попадает на светочувствительный слой 3 с другой его стороны. В результате пересечения двух потоков света: опорного потока света 6 от лазера и объектного потока света 7, отражённого от объектов, в месте их пересечения возникает интерференционная картина, называемая голограммой, которая фиксируется светочувствительным слоем.

После записи и проявления голограммы её можно демонстрировать, освещая голограмму лазером или точечным источником света. В случае отражательной голограммы голографическое изображение воспроизводится в виде световой копии объектов съёмки, которую и видит зритель [6].

Голографический кинематограф активно исследовался и разрабатывался в Советском Союзе во второй половине XX века [6]. Уже в 1976 году был изготовлен и публично показан первый 30-секундный экспериментальный монохроматический голографический кинофильм, созданный в процессе научных исследований, выполненных под руководством Виктора Григорьевича Кóмара в Научно-исследовательском кинофотоинституте

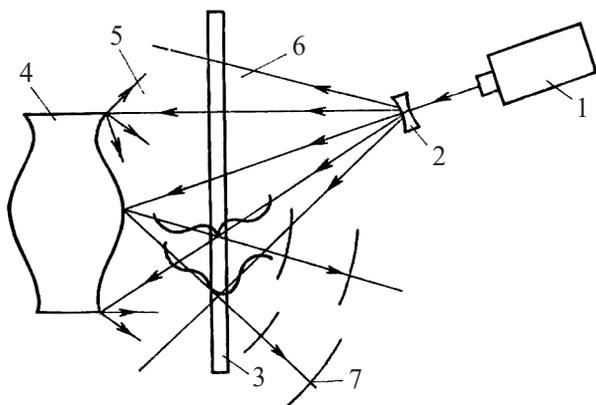


Рис. 2.1. Схема изготовления отражательных голограмм, предложенная Ю. Н. Денисюком [6]

(НИКФИ). В 1984 году Виктором Григорьевичем Кóмаром и Олегом Борисовичем Серовым впервые в мире была произведена киносъёмка на цветную голографическую киноплёнку и осуществлена кинопроекция цветного трёхмерного изображения на голографический экран. А уже в 1985 году на киностудии им. М. Горького был запущен проект «Третье измерение», в котором было запланировано создание 20-минутного анимационного голографического кинофильма. Однако в 1986 году финансирование всех работ по созданию голографического кинематографа было прекращено, и специализированная лаборатория в НИКФИ была ликвидирована [7]. На этом в нашей стране все работы, направленные на создание голографического кино, прекратились и до настоящего времени не возобновляются. О современных разработках голографического кинематографа в других странах автору не известно, в доступных ему публикациях таких сведений нет.

Голографический кинематограф не нашёл широкого применения в силу сложности технологии, необходимости использования когерентного лазерного излучения, дорогого и сложного в применении оборудования и не до конца решённых проблем создания и демонстрации цветного голографического киноизображения.

2.1.2. Интегральная технология

Альтернативным методом записи светового поля, базирующемся на традиционных оптических элементах (объективах, линзах, зеркалах), является метод интегральных изображений, разработанный Г. Липпманом* [8]. Метод основан на регистрации направлений световых потоков, попадающих на микроскопические линзы, регулярно установленные в пределах некоторой плоской поверхности. Каждая из линз формирует на поверхности светочувствительного слоя, расположенного за линзами, своё микроскопическое изображение снимаемых объектов. Изображения, формируемые разными линзами, отличаются между собой, поскольку линзы смещены относительно друг друга в пространстве, в результате чего каждая из линз формирует изображение со своего ракурса, отличного от ракурса записи изображения других линз [8–10]. Количество применённых линз определяет сколько изображений будет записано.

Пока фотоэмульсия была единственным средством регистрации фотоизображений, устранить технические проблемы, возникающие при разработке доступной для пользователей техники интегральной записи светового поля, обеспечивающей удовлетворительное качество изображения, не удавалось. К нерешённым проблемам относились [10]:

- низкое качество изображения, формируемое линзами;
- недостаточная светочувствительность и разрешающая способность фотоэмульсий;
- проблемы с получением качественного цветного изображения.

С приходом в кинематограф цифровых технологий и с последующими колоссальными успехами в совершенствовании как технического, так и программного обеспечения цифровой кинотехники, появилась возможность создания средств записи

* Липпман Габриэль Ионас (18 августа 1845 года — 13 июля 1921 года) — французский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1908 года. Разработал метод получения цветных изображений на основе интерференции. Создатель технологии интегральной фотографии.

световых полей по методу интегральной фотографии в цифровом формате. В результате были разработаны пленоптические камеры, которые регистрируют световое поле в пространстве изображений, формируемых основным объективом камеры. В этих камерах после основного объектива установлен микролинзовый растр, за которым расположена регистрирующая светочувствительная матрица. Снятая с матрицы информация позволяет рассчитать цифровую векторную модель светового поля, из которой, в свою очередь, рассчитываются обычные изображения. Причём многие операторские настройки, например, фокусировка на сюжетно важные объекты, выполняются не при киносъёмке, а при компьютерном расчёте обычного изображения из векторной модели светового поля.

Впечатляющим примером таких камер является пленоптическая камера Lytro Cinema с матрицей 755 мегапикселей, предназначенная для профессионального кинематографа, в том числе для производства как традиционных, так и стереоскопических фильмов [11].

Недостатками камеры Lytro Cinema являются её высокая цена, значительные габариты и вес, громадный объём записываемой и хранимой информации, что существенно сужает поле возможного применения в кинематографе.

2.1.3. Стереоскопическая технология

Если уменьшить количество линз в интегральной технологии и заменить линзы на профессиональные объективы, позволяющие формировать оптические изображения высокого качества, то приходим к технологиям многоракурсной стереосъёмки [9, 12, 13].

При многоракурсной стереосъёмке применяется от нескольких кинокамер до нескольких десятков кинокамер, которые синхронно снимают одну и ту же сцену с разных ракурсов. Если объекты съёмки неподвижны, то можно произвести покадровую съёмку одной фотокамерой последовательно с разных ракурсов.

После съёмки составляется параллакс-панорамограмма, представляющая собой последовательно чередующиеся вертикальные элементы изображений объектов, снятых с различных

ракурсов. Полученная параллакс-панорамограмма демонстрируется зрителям через специальный цилиндрический растр. В этом случае зритель без дополнительных приспособлений, в том числе без стереочков, видит объёмное изображение.

Упрощение многоракурсной киносъёмки до двухракурсной приводит к широко известной технологии стереокино. В этом случае запись светового поля упрощается до двухракурсной киносъёмки. Демонстрация стереоизображения производится таким образом, чтобы в левый глаз зрителя попадал световой поток от изображения, снятого левой камерой, а в правый глаз — от изображения, снятого правой камерой. Для этого в кинозале при кинопоказе выполняется разделение двух световых потоков. Функцию сепарации световых потоков выполняют стереочки, надеваемые зрителями во время просмотра стереофильмов. Стереочки разделяют световые потоки по спектру (анаглифный метод сепарации), по плоскостям поляризации (поляризационная метод сепарации), по времени (эклипсный метод сепарации).

Возможна и пространственная сепарация световых потоков, при реализации которой зрители могут смотреть стереофильм без очков. Именно так демонстрировался снятый режиссёром А. Н. Андриевским стереоскопический фильм «Концерт» («Земля молодости») в московском кинотеатре «Москва» с 4 февраля 1941 года по июнь 1941 года, пока Великая Отечественная война не прервала кинопоказы [14]. В наше время в кинематографе такие системы стереопоказа не применяются.

2.1.4. Однообъективная технология

Если киносъёмка выполняется одной камерой с одним объективом, то из всего светового поля съёмочной площадки записывается световая информация, фиксируемая только с одного ракурса. Это традиционная технология киносъёмки одним объективом, установленном на одной киносъёмочной камере.

ИТОГИ ПО ГЛАВЕ 2

В настоящее время наблюдается бурный прогресс в разработке и совершенствовании различных технологий записи и создания изображений.

Возможно, что фильмопроизводство в будущем будет основано на технологиях записи световых полей съёмочных сцен, эти технологии позволят перенести большинство функций творческой операторской работы со съёмочного периода на послесъёмочный период.

Но, как показывает анализ тенденций развития кинотехнологий, возможен и другой вариант будущего фильмопроизводства: создание кинофильмов от начала до конца будет выполняться программными средствами на компьютерах, без киносъёмок.

По какому пути пойдёт кинематограф, мы увидим в ближайшее время, а уже сейчас мы являемся свидетелями и участниками кардинальных изменений технологии фильмопроизводства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ К ГЛАВЕ 2

1. *Гершун А. А.* Световое поле. Ленинград ; Москва : ОНТИ. Глав. ред. общетехн. лит-ры, 1936. 178 с.

2. *Гершун А. А.* Теория светового поля // *Электричество*. 1947. № 10. С. 5–11.

3. *Соловьев А. К.* Теория светового поля и улучшение зрительной работы с объёмными объектами различения // *Строительные науки*. 2009. № 5. С. 470–475.

4. *Оптические приборы в машиностроении*. Справочник. Москва : Машиностроение, 1974. 238 с.

5. *Березин О. С.* Российская киноиндустрия 4.0 — цифровые кинофабрики или прогнозирование за гранью понимания // *Инновационные технологии в кинематографе и образовании : IV Международная научно-практическая конференция, Москва, 26–29 сентября 2017 г. : Материалы и доклады / под общей ред. О. Н. Раева*. Москва : ВГИК, 2017. С. 9–33.

6. *Комар В. Г., Серов О. Б.* Изобразительная голография и голографический кинематограф. Москва : Искусство, 1987. 286 с.

7. *Тютин С. В.* История голографического кино в России // *Запись и воспроизведение объёмных изображений в кинематографе и других областях : IV Международная научно-техническая конференция, Москва, 26–27 апреля 2012 г. :*

Материалы и доклады / под общей ред. О. Н. Раева. Москва : МКБК, 2013. С. 121–129.

8. *Lippmann G.* La photographie integrale // *Comptes-Rendus*. 1908. Vol. 146. P. 446–451.

9. *Валюс Н. А.* Стереоскопия : Фотография, кино, телевидение. Москва : Искусство, 1986. 263 с.

10. *Власенко В. И.* Техника объёмной фотографии. Москва : Искусство, 1978. 102 с.

11. *Ватолин Д. С., Боков А. А.* Возможности рендеринга кадров пленоптических камер // *Инновационные технологии в кинематографе и образовании : III Международная научно-практическая конференция*, Москва, 28–30 сентября 2016 г. : *Материалы и доклады / под общей ред. О. Н. Раева*. Москва : ВГИК, 2016. С. 16–27.

12. *Елхов В. А., Кондратьев Н. В., Овечкис Ю. Н., Паутова Л. В., Матвеева И. А., Шашкова В. Т., Котова А. В., Станкевич А. О., Зайченко Н. Л.* Разработка технологии изготовления модифицированного линзового раstra для автостереоскопического дисплея // *Запись и воспроизведение объёмных изображений в кинематографе и других областях : VII Международная научно-практическая конференция*, Москва, 23–25 апреля 2015 г. : *Материалы и доклады*. Москва : ВГИК, 2015. С. 210–222

13. *Елхов В. А., Кондратьев Н. В., Овечкис Ю. Н., Паутова Л. В.* Цифровой синтез многоакурсных стереоскопических изображений для безочковой растровой демонстрации // *Запись и воспроизведение объёмных изображений в кинематографе и других областях : IV Международная научно-техническая конференция*, Москва, 26–27 апреля 2012 г. : *Материалы и доклады*. Москва : МКБК, 2013. С. 167–177.

14. *Майоров Н. А.* Особенности режиссёрской работы при постановке стереофильмов // *Запись и воспроизведение объёмных изображений в кинематографе и других областях : VIII Международная научно-практическая конференция*, Москва, 25–26 апреля 2016 г. : *Материалы и доклады*. Москва : ВГИК, 2016. С. 219–227.