

Парадоксы феноменологии света (к оптической теории световых полей)

Д.В. БАХАРЕВ¹

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород

Аннотация

Подвергается критике гидродинамическая теория светового поля А.А. Гершуна. Показывается, что на макроскопическом уровне познания единственно адекватной феномену света является оптическая теория световых полей (ОТСП), рассматривающая распределение света в пространстве как аддитивную комбинацию рассеянных и размытых пространственных оптических изображений светящихся объектов. Приводятся примеры рассчитанных и визуализированных на основе ОТСП структур световых полей, порождаемых естественным освещением и световыми приборами с диффузным и зеркальным отражением. Указывается на необходимость введения обязательного курса начертательной геометрии (включая геометрию рассеянных и размытых изображений) в программы вузовской подготовки физиков-оптиков и светотехников.

Ключевые слова: оптические изображения (ОИ), рассеянные ОИ, размытые ОИ, чёткие ОИ, теория светового поля, структура световых полей, диффузные отражатели, зеркальные отражатели.

Подводя в «Успехах физических наук» [1] итоги развития фотометрической теории светового поля (ФТСП) до последней четверти прошлого века, Г.В. Розенберг писал: «Интуитивные в своей основе фотометрические представления имеют сугубо эмпирическое происхождение. Возникнув в эпоху раннего Ренессанса они сложились к середине XVIII века в стройную систему взглядов, обессмертивших имена Бугера и Ламберта. С тех пор эти представления сохранились в почти неизменном виде до наших дней и вошли во все учебники физики как самостоятельная ветвь оптики, никак не связанная с её основным содержанием

и поэтому имеющая прикладное значение».

Неизбежно возникает вопрос: в чём причина обособленности этого раздела оптики? Каким образом формирующие его достаточно примитивные представления устояли под напором современной науки? Почему они не были сметены ни вековым развитием классической электродинамики, ни такими «взрывами», как появление квантовой электродинамики и статистической оптики? Следует помнить, что речь идёт не о каких-то частностях, а о фундаментальных «истинах», обязательных для каждого школьника [1, с. 98].

Тщетно пытаюсь «взорвать» этот бастион школьных истин, статистическая оптика объясняла живучесть его «чисто феноменологических» представлений «простотой и наглядностью геометрооптических образов классической теории переноса, таких как «лучевая трубка», «некогерентные пучки излучения» и т. д. Используемые в ней рассуждения выглядят весьма убедительными и на первый взгляд не требуют никаких дополнительных пояснений [2, с. 8].

Основоположник ФТСП А.А. Гершун полагал, однако, что «новое понятие о световой линии, об определённой кривой, проходящей через рассматриваемую точку светового поля, не является столь же наглядным и нуждается в физической интерпретации, в проведении аналогии с величинами, вошедшими в научный обиход. Эти аналогии правильнее всего искать, исходя из гидродинамики. Свет, также как и ряд других физических агентов, как, например, теплота, электричество, в повседневных представлениях человечества всегда воспринимался движущейся материей, и эта материя уподоблялась текущей жидкости. На этом строились и строятся художественные образы, обиходные выражения, на них строилась и научная терминология. Ряд таких выражений как «море света», «залито светом» во-

шёл в обиход. Ряд прекрасно подобранных примеров, подтверждающих правильность этого положения, читатель найдёт в книге акад. С.И. Вавилова «Глаз и Солнце». Поэт говорит, что «свет льётся», инженер и учёный говорят о «световом потоке», о «световых волнах». Математическая физика в своём развитии всегда опиралась на механику сплошных сред. Этот этап, в общем, уже пройден научной мыслью, но отдельные вопросы физики, математическая теория которых почему-либо не привлекала к себе внимания, ещё через него не прошли. К числу этих вопросов принадлежит и рассматриваемая нами теория фотометрического расчёта [3, с. 8].

Таким образом, упущение в пройденном этапе научной мысли было восполнено «гидродинамической» теорией светового поля [3], устранившей из феноменологии света сам феномен света, – ни в одной из цитированных работ не упоминается оптическое изображение, лежащее в основе нашего чувственного, зрительного восприятия света. В этом заключается основная, если так можно выразиться, гидродинамический парадокс ФТСП: в пене восторженного приобретения к общей математической теории векторного поля из ФТСП выплеснули ребёнка – оптическое изображение светящихся объектов (ОИ).

Почему и как это случилось? Ведь мы воспринимаем свет только в виде зрительных образов конкретных светящихся объектов, которые дают нам 90 % информации о внешнем мире. Почему «ослепли» как представители фундаментальной оптики, так и прикладники, на протяжении столетия пытающиеся создать теорию фотометрического расчёта, игнорирующую тот очевидный факт [4, 5], что световые поля, порождаемые любыми источниками света, световыми приборами и любой системой освещения, есть пространственные ОИ этих источников, приборов и систем?

Сейчас, после создания оптической теории светового поля (ОТСП) [4, 5], ответить на недоумённые вопросы представителей фундаментальной оптики не составляет затруднений. «Взрывы» квантовой электродинамики и статистической оптики гремели только в головах физиков. В обыденном сознании людей по-прежнему царили тишина и по-

¹ E-mail: dbakharev@yandex.ru

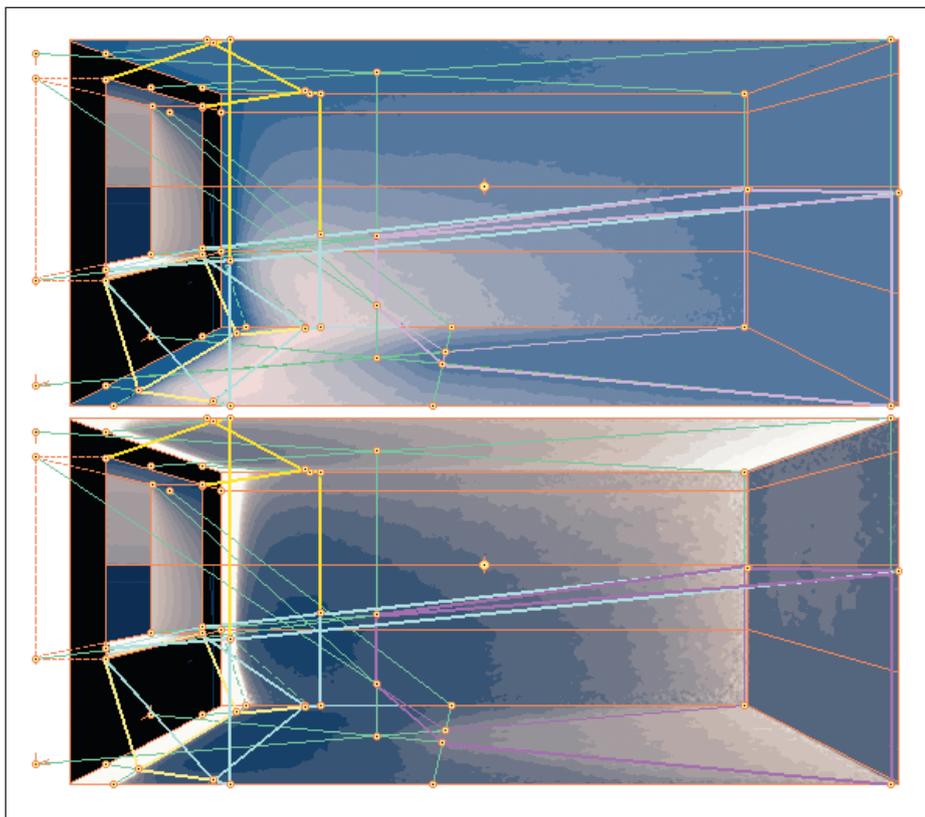


Рис. 1. Пример единой физической структуры всего множества полей в помещении, освещаемом заданными объектами внешней среды (вверху – поле освещённости, внизу – поле коэффициента r)

кой – как видел мир человек доисторический, так его продолжают видеть и наши современники. Пострадали от этих «взрывов» только феноменологические разделы оптики и теории переноса излучения, превратившиеся в абстрактно-математическую схоластику, лишённую адекватного явления качественного содержания.

Действительно, мы чувственно воспринимаем электромагнитное поле только в виде зрительных образов светящихся объектов, в физической основе которых лежат их более или менее чёткие ОИ, проецируемые хрусталиком на сетчатку глаза. Предпосылки эволюции оптической системы глаза были заложены в структуре светового поля, представляющей собою макроструктуру электромагнитного поля на феноменологическом уровне. Простейшая структура рассеянных ОИ предметов привела к образованию светочувствительных клеток в кожных покровах простейших беспозвоночных животных, сложная структура более совершенных размытых ОИ – к формированию глазных впадин и диафрагмы зрачков. Процесс эволюции глаза завершил хрусталик. Эта природная линза, фо-

кусирующая в глазном яблоке сходящиеся пучки лучей, породила предельно адекватный светящим объектам вид естественной структуры световых полей – чёткие ОИ.

Здесь весьма поучительна ветвь эволюции фасеточного зрения насекомых, у которых выпуклая форма глаза физически не могла обеспечить чёткого зрения. Поэтому в мире насекомых эволюция материи зашла в тупик. В аналогичном тупике оказалась и ФТСП, прошедшая мимо действительной кусочно-непрерывной структуры световых полей, характерной для оптических изображений. Таким образом, чёткие ОИ не являются продуктом созданных человеком оптических устройств, как это обычно представляется в научно-технической литературе с присущим нашему мышлению антропоцентризмом. Это естественная структура саморазвития материи. На уровне растительного мира эволюция победила энтропию. В высшей форме животного мира материя чувственно, зрительно осознала себя, а с появлением второй сигнальной системы у человека – научилась мыслить и приступила к образно-абстрактному самопо-

знанию и целенаправленному преобразованию и развитию.

Процесс познания оказался сложным и противоречивым. Разделение труда и специализация в технике и науке привели к гносеологическим парадоксам, в которых перепутались причины и следствия. Различное практическое приложение научных знаний раздробило целостное содержание оптики на изолированные друг от друга, утратившие взаимосвязь разделы. Из того факта, что ФТСП вошла «во все учебники физики как самостоятельная ветвь оптики, никак не связанная с её основным содержанием», не следует её исключительно «прикладное значение». Геометрическая оптика, как феноменологический раздел теории переноса излучения, также имела преимущественно прикладное значение. Познав созданные эволюцией естественные средства и законы формирования чётких ОИ, геометрическая оптика целенаправленно развила далее инструментальную способность мыслящей материи видеть удалённые и мелкие объекты.

Именно различное практическое «приложение» теории четких ОИ породило второй парадокс феноменологии света – разделение единых знаний о свете на две изолированные друг от друга науки – геометрическую оптику и начертательную геометрию. Первая, познающая физические свойства оптических систем для резкого видения объектов независимо от их формы, была признана классическим разделом физической оптики. Вторая, изучающая законы формирования и структуру четких ОИ конкретных светящихся объектов для их адекватного плоского воспроизведения в технике и искусстве, – отлучена от физики и исключена из программ университетского физического образования как чисто прикладная техническая дисциплина. Дипломированные физики-оптики, неосведомлённые в построениях линейного рисунка чёткого ОИ даже простейших конкретных объектов, оказались не подготовленными к обнаружению и пониманию более сложной пространственной макроструктуры световых полей как аддитивной комбинации рассеянных и размытых ОИ светящихся объектов (рис. 1).

Используя далее термин «поле» в единственном и множественном

числе, будем тем самым полагать, что в него вкладывается как физическое понятие электромагнитного поля (в отличие от вещества), так и математическое понятие пространственного распределения любых величин, характеризующих это поле на макроскопическом уровне. Например, поле освещённости и отношение результирующего КЕО в помещении к его прямой составляющей – коэффициента r_0 есть математические поля, единой структурой которых является пространственный рисунок размытого ОИ светящихся объектов внешней среды (ОВС), проецируемых апертурной диафрагмой окна в пространство и на поверхности помещения (рис. 1). Этот рисунок есть физическая основа любых световых полей и их характеристик в данном помещении, освещаемом данными ОВС, независимо от характера их свечения.

На рис. 1 помещение, противостоящее зданию и поверхность земли освещаются стандартным пасмурным небом МКО. Если небо прояснится и выглянет Солнце, то поле яркости ОВС резко изменится и станет случайно нестационарным, зависящим от непредсказуемых погодных условий. Случайными станут и поля всех величин, характеризующих естественное световое поле в помещении, и, следовательно, необходимая для обеспечения зрительной работы подсветка помещения приборами искусственного освещения. Единственным надёжным фундаментом моделирования такого реального, совмещённого освещения останутся только неизменная структура естественного светового поля в пространствах ОВС и помещения и структура поля, создаваемая осветительной установкой искусственного освещения.

Структура (от лат. *structura* – строение, расположение) – это система устойчивых связей объекта, обеспечивающих его целостную качественную определённость и тождественность самому себе при различных внутренних и внешних изменениях. Если объектом исследования является оптическое (видимое, зримое) световое поле, т. е. распределение света в пространстве, то под его структурой следует понимать пространственные и линейные рисунки ОИ светящихся объектов, создающих это

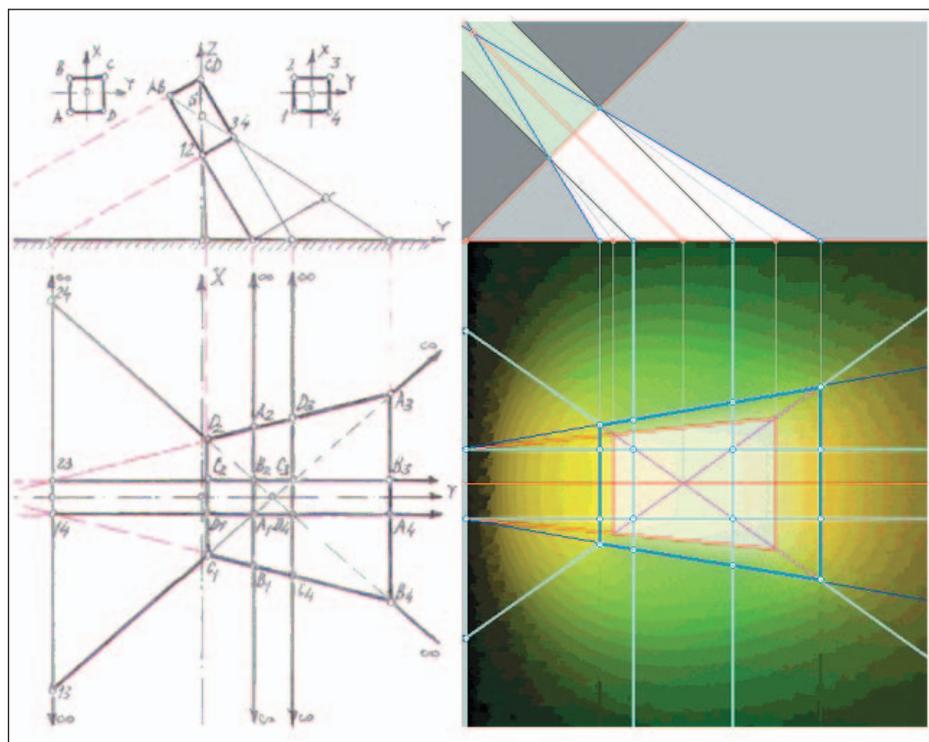


Рис. 2. Структура оптического изображения (ОИ) внутренней полости светильника (1993 г.) и синтезированное программой Radiance в 2008 г. ОИ аналогичного светового прибора с диффузно отражающим кожухом

поле [4, 5]. Никакие изменения оптических параметров ОВС и помещения не могут нарушить показанные на рис. 1 зоны чистого ОИ здания (фиолетовый контур), неба и земли (жёлтые контуры) и зоны их смещения (голубые и зелёные контуры). Для этого придётся изменить геометрические параметры вещественных объектов, создающих данное поле, но это будет уже другой объект и другое поле.

Таким образом, световые линии и трубки не являются структурой световых полей, как это ошибочно полагал А.А. Гершун [3, глава V «Структура светового поля»]. Это всего лишь математическая «закраска» физической структуры, аналогичная полям, показанным на рис. 1. Математических полей может быть сколько угодно. О безошибочности и эффективности того или иного математического аппарата можно легко и надёжно судить по соответствию результатов расчёта физической структуре поля. Как было показано в [4], гидродинамическая аналогия [3] не выдержала этой проверки.

Открытые почти 20 лет назад явления рассеянных и размытых ОИ и следующая из них ОТСП до сих

пор игнорируются в фотометрии и светотехнике. Это можно объяснить не только инерцией ортодоксального мышления, но и тем, что ОТСП была разработана в основном для решения задач расчёта естественного освещения (ЕО) помещений. Продемонстрированные на 1-й Международной светотехнической конференции в Санкт-Петербурге в 1993 году рисунки ОИ, создаваемые приборами искусственного освещения, не вошли в опубликованные тезисы доклада [6]. Пришлось ограничиться пояснениями, что ОТСП одинаково справедлива для любых систем освещения. Различие заключается только в том, что светопроём проецирует размытое ОИ светящейся внешней среды на поверхности помещения, а выходное отверстие светового прибора (СП), наоборот, – светящую внутренность СП на освещаемые им поверхности внешней по отношению СП среды.

Приведём здесь один из рисунков структуры размытого ОИ светильника, которые демонстрировались на конференции (рис. 2, слева). Как видно на расчётной схеме, квадратное выходное отверстие 1-2-3-4 СП проецирует на поверхность XOY сильно размытую пер-

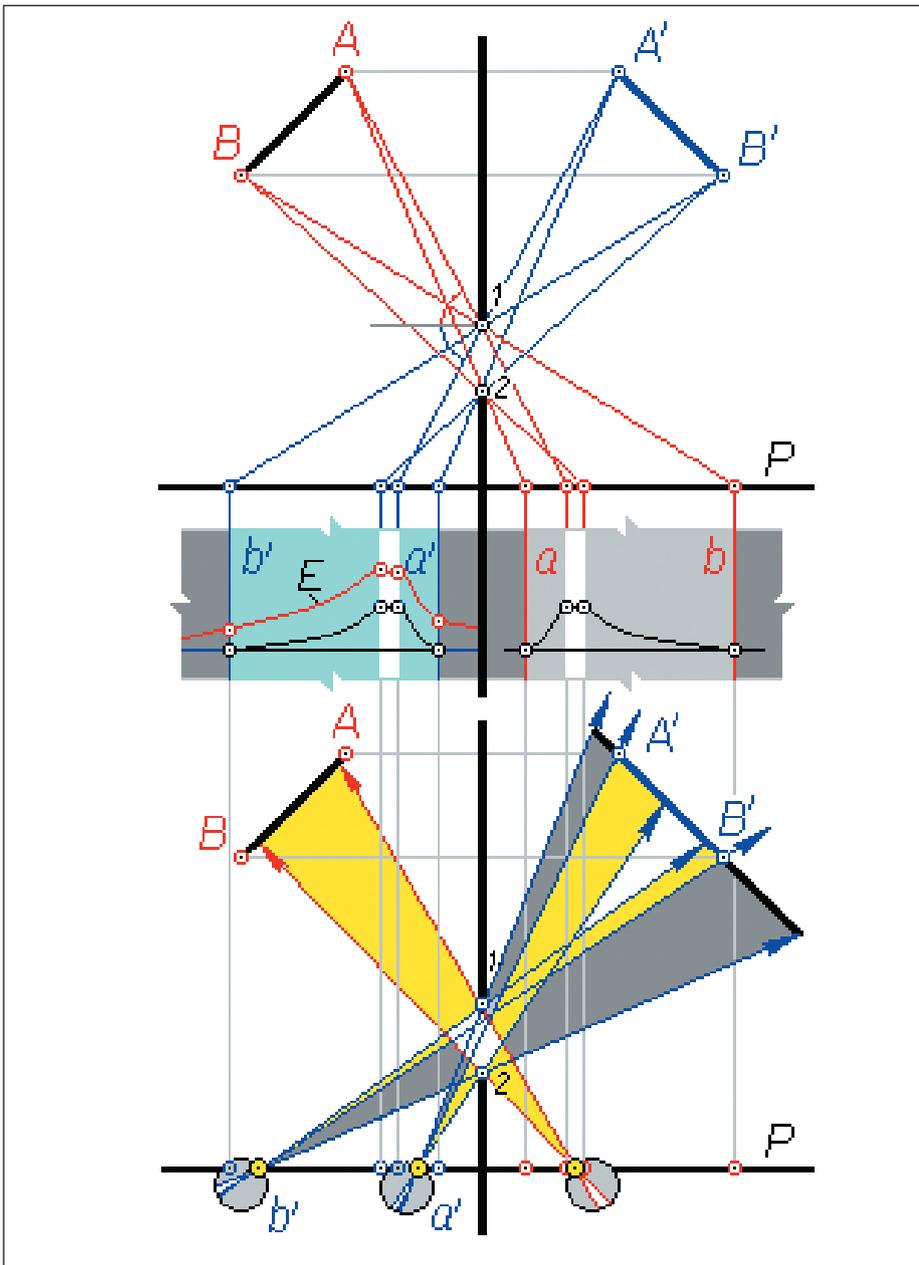


Рис. 3. Пропускание и зеркальное отражение

спективу внутренней полости СП, где трапеции $A_1A_2A_3A_4$, $B_1B_2B_3B_4$, $D_1D_2D_3D_4$ – есть изображения вершин A , B , C , и D кожуха СП, равнобочная трапеция $A_3B_4C_1D_2$ – изображение задней стенки кожуха. Выходящие из изображений вершин кожуха в бесконечность линии являются контурами боковых граней кожуха. В размытой точке схода $A_1B_2C_3D_4$ смешиваются изображения всех четырёх вершин кожуха. Полосы парного смещения боковых граней с трёх сторон также устремляются в бесконечность. Проецирование кожуха через линзу в центре выходного отверстия СП даст его чёткую перспективу [7].

Как видно на схеме (рис. 2), структура ОИ светильника является «обратной перспективой», о которой в искусствоведении и психологии исписаны горы бумаги и сломано множество копий [8]. Перспектива не является иллюзией нашего зрения, как это часто представляется в литературе. Это физический закон распределения света в пространстве. Пространственная структура любых световых полей всегда является прямой перспективой, т. е. изображения светящихся объектов уменьшаются по мере их удаления от проецирующей диафрагмы. Обратной может быть только линейная перспектива в плоском сечении размытого изображения, не

перпендикулярном оптической оси диафрагмы (рис. 2). Статистические эксперименты по рис. 1, выполненные в программе *Radiance* И.А. Зимновичем для поля ЕО и С.А. Одеговым (рис. 2) для поля искусственного освещения (ИО), подтвердили, с одной стороны, справедливость ОТСП, с другой, – безошибочность реализации метода Монте-Карло в *Radiance*. Для выявления сильно размытого изображения в эксперименте по рис. 2 противоположные диффузно отражающие грани кожуха светильника окрашены в разные цвета.

Рассмотрим с позиций ОТСП структуру зеркального отражения от плоского зеркала. Бытующее мнение, что зеркала дают чёткое ОИ, является ошибочным. Это наглядно демонстрирует пример пропускания и отражения плоского поля бесконечной светящей полосы AB бесконечной щелью 1–2 или аналогичной зеркальной лентой (рис. 3). При пропускании света щель спроецирует на плоскость P размытое изображение полосы ab , где a и b – контурные зоны смещения изображений светящей полосы и тёмного фона, а белая полоска между ними – зона чистого изображения полосы. Закрыв щель зеркальной лентой, получим симметричное размытое изображение $a'b'$ от мнимого изображения полосы $A'B'$, освещённость E которого прибавится к освещённости рассеянного изображения, создаваемого действительной полосой AB . Чёткие перевёрнутые фрагменты ОИ полосы вблизи плоскости P образуются на сетчатке глаза, оптический центр хрусталика которого находится в той или иной зоне её размытого ОИ. Чёткие образы мира существуют только в мозге человека. Даже плоские фотографии физически дают лишь рассеянное ОИ. Увидеть и понять, что на них закодировано неравномерностью отражения зёрен фотоэмульсии, дано только человеку.

Примерно также обстоит дело с полями отражений от вогнутых зеркал. Рассмотрим предварительно идеальный случай сферического отражателя с равномерным точечным источником света.

Как видно из рис. 4, точка S равномерно излучает своё пространственное ОИ, часть которого отражается от зеркальной сферы с центром

O , а другая – свободно выходит через круглую диафрагму AB в пределах конического телесного угла ASB и даёт на освещаемой плоскости рассеянное ОИ источника S в границах угла ASB . Центральная часть графика освещённости этого плоского ОИ выделена красным цветом. Поскольку изображение рассеянное, то график освещённости будет гладкой кривой в границах ОИ с максимумом на оси выходного отверстия.

Отражённое поле имеет сложную структуру, воспроизводящую форму и взаиморасположение светящей точки и отражателя. Зона чёткого ОИ отражателя ограничивается двумя полостями конуса $AA'B'B'$, образованными лучами, исходящими от кромки отверстия. Верхняя полость выделит внутренний участок рассеянного ОИ, заключающий источник света, и его внешнее коническое кольцо, ограниченное гиперболической огибающей лучевого цилиндра фокальной зоны ОИ. Усечённый верхней кромкой отражателя узкий конус образует фокальный тороид, воспринимаемый в плоском ОИ ярким фокальным кольцом. Освещённость фокальной зоны на участке ab складывается из ординат тёмно-фиолетового графика в интервалах ab , ac и cd .

Продолжение показанной синими линиями пространственной структуры поля отражателя в дальнюю зону очевидно. В перпендикулярном оси отражателя сечении пространственного рисунка ОИ освещаемой плоскостью радиусы круга рассеяния, зоны отражателя и фокальной зоны будут увеличиваться, а толщина фокального кольца – уменьшаться. Наклон освещаемой плоскости к оси превратит окружности линейного рисунка в перспективные изображения эллипсов, стремящихся к параболам. Кососветный отражатель с эллиптическим выходным отверстием даст ассиметричную структуру ОИ.

На рис. 4 видно, что изображения светящей точки и освещаемого ею сферического зеркального отражателя являются чётким ОИ на фоне рассеянного ОИ точки. Изображения не имеют зон размыва. Векторные трубки, очевидное построение которых показано слева, терпят перелом на границах зон. Графически показать их в фокальном тороиде затруднительно, – узкие трубки сливаются. Предлагаем читателю завершить на-

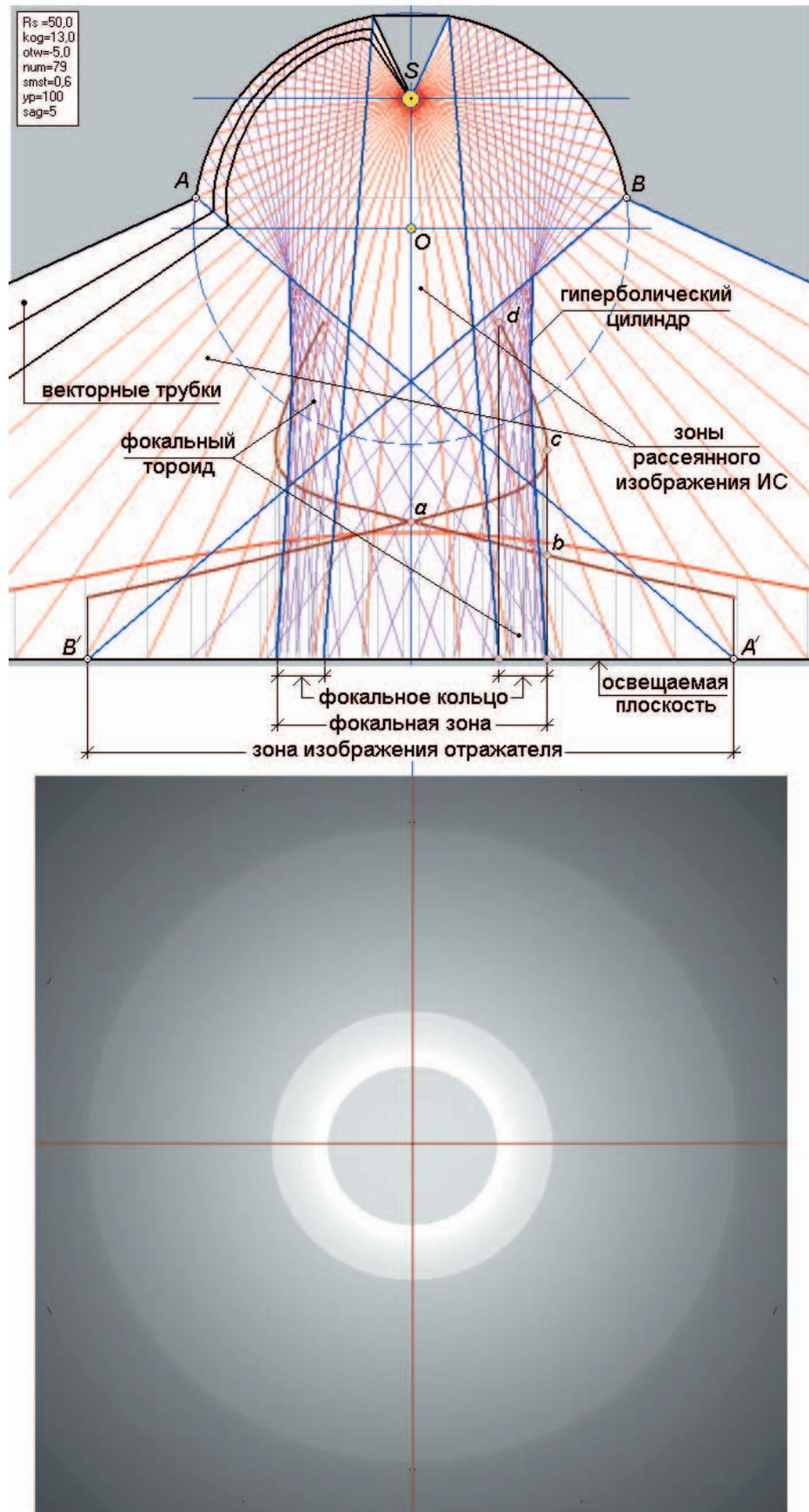


Рис. 4. Пространственная структура светового поля зеркального сферического отражателя с точечным источником света и его плоское оптическое изображение

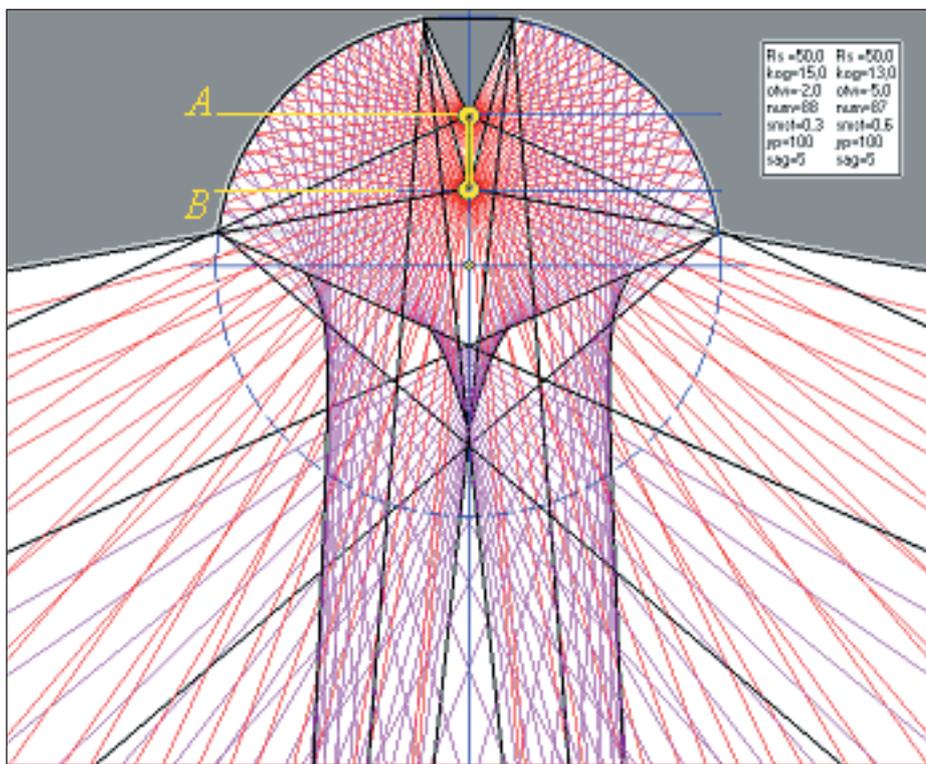


Рис. 5. Пространственная структура поля размытого оптического изображения линейного источника света AB

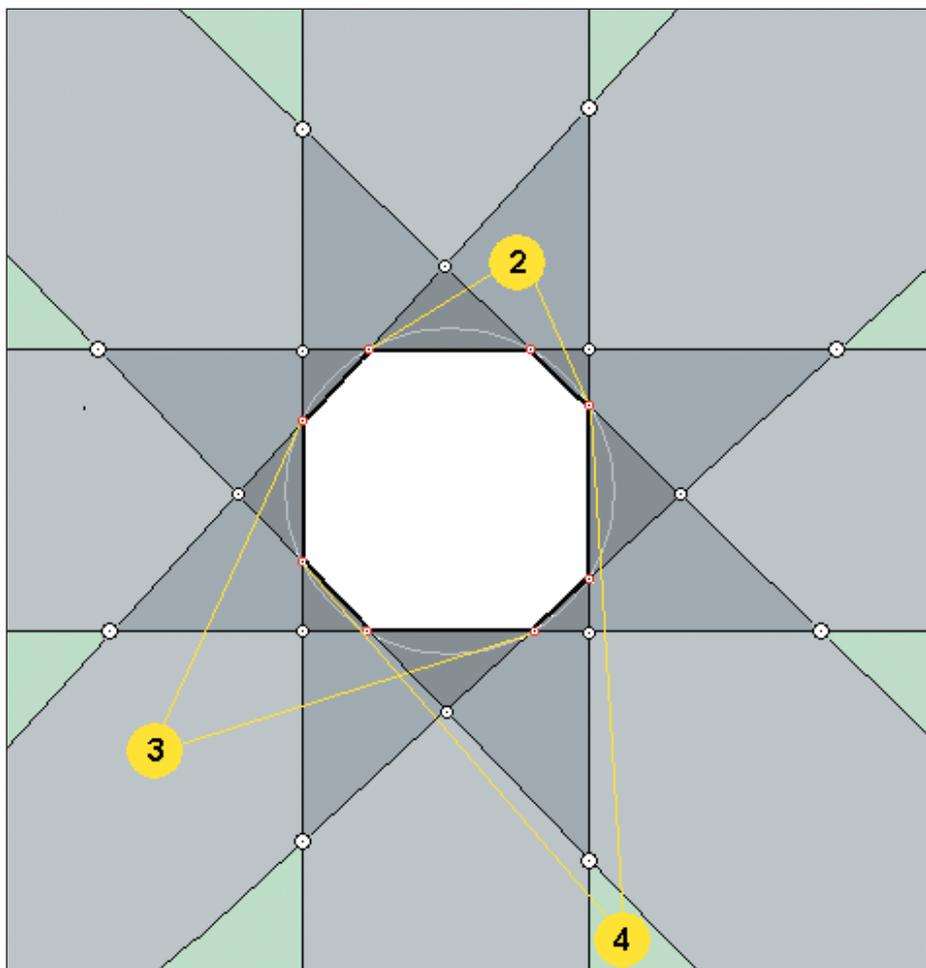


Рис. 6. Звёздно-слоистая структура поля рассеянного изображения восьмигранной призмы

чатое построение и самостоятельно убедиться, что для построения ОИ гидродинамическая аналогия не является необходимой. Для расчёта световых полей на макроскопическом уровне достаточны классические законы фотометрии и геометрической оптики.

Замена светящей точки реальным объёмным источником света (ИС) превращает чёткие ОИ зеркального отражателя и ИС в размытое изображение (рис. 5) со всеми вытекающими последствиями, рассмотренными выше. Знание структуры ОИ значительно упрощает решение множества известных задач проектирования световых приборов, подробно рассмотренных в учебниках [9], открывает широкие возможности для разработки конструктивных методов дизайна световых пятен и даёт надёжный инструмент для визуального контроля безошибочности расчётов и измерений любых характеристик светового поля. Если поле данной характеристики не подчиняется структуре (рисунку) пространственного изображения светящихся объектов, то его расчёты или измерения заведомо неверны.

Определение светового поля как пространственного оптического изображения, воспроизводящего форму и положение светящихся объектов, характер их свечения и оптические (т.е. видимые, зримые) свойства среды, в которую они светят, по существу, отождествляет ФТСП с теорией оптических изображений, понимаемых в самом широком смысле. Поэтому нельзя согласиться с утверждением Г.В. Розенберга, что «когда речь идёт о световом поле (в том числе об оптическом изображении) представление об образующих его световых лучах связано не с самим полем или вносимыми в него воображаемыми диафрагмами, а с воспринимающим свет приёмником [1, с. 114]». Это может быть справедливо только для чётких ОИ, воспринимаемых глазом человека, но не для пространственных рассеянных и размытых ОИ, существующих независимо от приёмников света.

Световые поля порождаются не приёмниками, а источниками излучения. Как видно из рис. 6, структура рассеянного ОИ светящей призмы определяется её формой. Приёмник излучения (например, глаз человека)

может видеть форму объекта только в зависимости от того, в какой зоне этой структуры он находится. Например, в ближнем слое зон человек сможет увидеть только одну ближайшую грань призмы, во втором слое зон – две грани, в третьем слое – три грани, в самом удалённом, четвёртом – четыре грани. Больше четырёх граней человек не увидит, где бы он не находился.

Показанная на рис. 6 идеальная структура поля в принципе сохраняется при его трансформации веществом среды, в которую светит призма. Изменения структуры, от размывания и деформации рисунка до его полного исчезновения, определяются флуктуациями плотности рассеивающего и поглощающего веществ и зависят от расстояния до призмы. Точно такие же зависимости определяют видимость призмы человеком, находящимся в той или иной зоне поля. Чем дальше от призмы наблюдатель, тем хуже её видимость. В удалённых зонах структура ОИ и грани призмы сливаются и могут вообще исчезнуть.

Как было показано в [4], световые поля светящихся объектов, ограниченных кусочно-непрерывными поверхностями, на макроскопическом уровне не имеют потенциала. В реальных световых полях можно провести только кусочно-непрерывные эквимодульные поверхности – геометрические места точек с одинаковым значением модуля светового вектора. Утверждения А.А. Гершуна, что «световую энергию можно ... уподобить ... текущей жидкости» и что «световой вектор есть скорость течения этой фиктивной «лучистой жидкости» [3, стр. 114]», явно ошибочны. Скорость света, измеряемая в км/с, общеизвестна, световой вектор имеет размерность $лм/м^2$ и уже поэтому никак не может быть скоростью течения даже фиктивной лучистой жидкости. Пора очнуться от потребления этой жидкости, залитой в бутылку с этикеткой «Теория светового поля». Описание реального мира на макроскопическом уровне не нуждается в математических фикциях.

Завершая обзор [1], Г.В. Розенберг писал: «Мы обнаружили, что пользование оптическим приёмником с неизбежностью порождает приближение лучевой оптики, т.е. замкну-

тую систему представлений, понятий и соотношений, составляющих реальное содержание современной теории светового поля. Последняя, как мы убедились, охватывает с единых позиций такие разделы оптики, как геометрическая оптика, фотометрия, поляриметрия, трансформация луча веществом, теория переноса излучения и т. п.

Образ луча, казалось, связанный с источником света, но в действительности порождаемый актом измерений при помощи оптического приёмника (например, глаза) переносит нас из привычного координатно-временного в частотно-импульсное пространство фурье-образов, для которого и определяются основные понятия и величины лучевой оптики, включая и специфические формулировки законов сохранения и законов трансформации. Именно здесь заложены особенности оптической трактовки и оптического способа описания явлений [1, с 135]».

Обзор [1], опубликованный за 16 лет до открытия рассеянных и размытых изображений, естественно, не учитывал этих объективных природных явлений, без которых была бы невозможна сама эволюция глаза. Образ луча, как и образы любых видимых нами предметов и явлений внешнего мира, воспринимаются глазом в привычном для нас координатно-временном пространстве. Поэтому на макроскопическом уровне единственно адекватной явлению «замкнутой системой представлений» может быть только оптическая теория световых полей, немислимая без построений начертательной (проективной) геометрии. Это доказала почти 50-летняя практика компьютерного синтеза изображений, зародившегося не в фундаментальной оптике, а на вузовских кафедрах «прикладной» начертательной геометрии и машинной графики.

Неосведомлённость в геометрии изображений препятствует публичному признанию, упоминанию и критике ОТСП, т.е. приводит к нарушению этического принципа «организованного скептицизма». Необходимо дополнить программы вузовской подготовки физиков-оптиков и светотехников курсом начертательной геометрии, включающим раздел геометрии пространственных рассеянных и размытых изо-

бражений. Этого настоятельно требуют и современная когнитивная концепция технического образования, призванная обеспечить развитие не только левой – логической, но и правой половины мозга, таинственно творящей наше драгоценное интуитивно-образное, неосознанное мышление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Розенберг Г. В. Луч света. К теории светового поля // УФН. – 1977. – Т. 121, № 1. – С. 97–138.
2. Апресян Л.А., Кравцов Ю.А. Теория переноса излучения. Статистические и волновые аспекты. – М.: Наука, 1983. 215 с.
3. Гершун А.А. Избранные труды по фотометрии и светотехнике. – М.: ГИФМЛ, 1958. – С. 224–367.
4. Бахарев Д.В. О структуре световых полей // Светотехника. – 2005. – № 3. – С. 40–44.
5. Бахарев Д.В., Орлова Л.Н. Изображение оптическое (к определению основного понятия теории светового поля) // Светотехника. – 2007. – № 2. – С. 4–7.
6. Бахарев Д.В. Об оптической природе полей освещённости // Тр. 1 Межд. светотехн. конф., 13–18 июня 1993 г., Санкт-Петербург. С. 110.
7. Бахарев Д.В. Геометрия размытого оптического изображения // Светотехника. – 1993. – № 8. – С. 10–13.
8. Раушенбах Б.В. Системы перспективы в изобразительном искусстве. Общая теория перспективы. – М.: «Наука», 1986. 255 с.
9. Трембач В.В. Световые приборы: Учеб. для вузов по спец. «Светотехника и источники света». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. 463 с.



Бахарев Деомид Вениаминович,

кандидат техн. наук.
Окончил в 1957 г.
Казанский институт
инженеров-
строителей
нефтяной
промышленности.
Профессор

кафедры архитектуры Нижегородского
государственного архитектурно-
строительного университета

О статье «Парадоксы феноменологии света (к оптической теории световых полей)»

Статья посвящена научно-методологическим вопросам формирования фотометрической теории светового поля (ФТСП). Рассматривается полнота лежащих в её основе понятий и представлений, предлагаются новые понятия и «показывается», что на макроскопическом уровне познания единственно адекватной феномену света является оптическая теория световых полей (ОТСП).

Современное состояние ФТСП характеризует блестящая монография Л.А. Апресяна и Ю.А. Кравцова [2]. В этом смысле работы [1] и [3] по физическому обоснованию ФТСП, где впервые были выдвинуты идеи светового поля и его лучевого содержания, на сегодняшний день имеют исключительно историческое значение. Наряду с глубокими идеями, эти публикации содержат неверные или неточные в свете современных представлений положения. Например, на сегодня очевидно, что фундаментальное значение в фотометрии имеет поле яркости – световое поле, а не поле светового вектора, как предлагал А.А. Гершун. На смену физически ярких, но образных идей Г. В. Розенберга в [2] выдвигается математически строгая, с современных позиций статистической оптики, теория светового поля, раскрывается физическое содержание всех понятий фотометрии.

Тот факт, что содержание [2] не вошло в основной учебник для светотехников в нашей стране – Мешков В.В. «Основы светотехники» – говорит только о том, что этот учебник, основанный во многом на немецких источниках начала XX века, устарел. На сегодня жизненно необходимо написание нового, современного учебника, но это предмет совсем другой, хотя и очень важной дискуссии. Здесь хочу ограничиться замечанием, что и само слово «светотехника», являющееся переводом немецкого «*die Lichttechnik*», не используется в современной литературе. Англоязычный термин «*Light Engineering*», изобретённый нами, в основном толковом словаре английского языка *Webster* отсутствует и малопонятен миру. В англоязычной (читай, мировой) литературе сформировался термин «фотоника» («*Photonics*»), который более соот-

ветствует использованию светодиодов и лазеров, приёмников, цифровых технологий. Существуют десятки конференций по фотонике, издаются многочисленные журналы с высоким импакт-фактором. Более узкая техника освещения является частью фотоники, что также важно, поскольку позволяет определить близкие области науки, литературы, техники.

Кратко сущность современной теории светового поля сводится к тому, что при некоторых достаточно общих условиях (квазиоднородность) электромагнитное поле асимптотически представляется световым, где каждая точка пространства пронизывается независимыми лучами, по которым протекает энергия, мерилом плотности которой является яркость. Тем самым основополагающими понятиями ФТСП является луч света и яркость, которая задаётся функцией точки и направления, т. е. задаваемая в 5-мерном фазовом пространстве, на что указывалось ещё в [3]. При этом уравнения Максвелла переходят в уравнение переноса излучения, описывающее трансформацию яркости в указанном фазовом пространстве.

Ни о каких гидродинамических представлениях в современной теории светового поля нет и речи. Они соответствовали оптике первой половины XX века и ушли из неё после развития в 1950-е годы статистической оптики. Это как бы сейчас взять и раскритиковать теорию теплорода в термодинамике или флогистона в химии. Естественный вопрос: почему же не теория Л.А. Апресяна определяет современное состояние, а исторически устаревшая гидродинамическая теория Гершуна? Зачем спорить с понятиями светового вектора или фиктивной лучистой жидкости, если существует современная теория, непротиворечивым образом вводящая понятие луча света, светового поля и яркости из электродинамики и квантовой электродинамики?

Д.В. Бахарев указывает, что этих представлений недостаточно и ФТСП должна быть дополнена понятиями чёткого и нечёткого оптических изображений светящихся объектов (ОИ). Методологические вопросы формирования те-

ории давно интересовали науку, и здесь уже сформулированы некоторые фундаментальные представления, среди которых можно выделить «бритву Оккама». Наиболее доступный источник информации об этом понятии содержится в энциклопедии *Wikipedia*, и в связи с важностью этого понятия для оценки статьи приведу оттуда цитату:

«Бритва (лезвие) Оккама» – методологический принцип, получивший название по имени английского монаха-францисканца, философа-номиналиста Уильяма Оккама (Ockham, Ockam, Ossam; ок. 1285–1349). В упрощённом виде он гласит: «Не следует множить сущее без необходимости» (либо «Не следует привлекать новые сущности без самой крайней на то необходимости»). Этот принцип формирует базис методологического редукционизма, также называемый принципом бережливости или законом экономии.

Однако то, что называют «бритвой Оккама», не было сформулировано Оккамом, он всего лишь сформулировал принцип, известный ещё со времён Аристотеля и в логике носящий название «принцип достаточного основания». «Бритва Оккама» – это лишь название принципа, а не его атрибуция (указание на авторство).

Бритва Оккама используется в науке по принципу: если какое-то явление может быть объяснено двумя способами, например, первым – через привлечение сущностей (терминов, факторов, преобразований и т. п.) А, В и С, а вторым – через А, В, С и D, и при этом оба способа дают одинаковый результат, то сущность D лишняя, и верным является первый способ (который может обойтись без привлечения лишней сущности).

В соответствии с указанным методологическим принципом по содержанию статьи имеется ряд вопросов:

- Какие явления, эффекты или отношения ФТСП нельзя объяснить, исходя только из лучевых представлений, а необходимо использовать чёткие или нечёткие ОИ? Что НЕ ПОЗВОЛЯЕТ описать теория Л.А. Апресяна из явлений светового поля без привлечения чётких или нечётких ОИ, и не являются ли ОИ следствием этих представлений (о чём ещё будет сказано ниже)?

- Ни в одной из статей Д.В. Бахарева мне не удалось найти однозначного определения чётких или нечётких ОИ. Можно ли их определить, не

прибегая к понятию луча? Очень важно определить ОИ вне понятий луча, иначе это будет уже не основополагающее понятие теории, а производное, которое каждый может использовать по своему понятию.

- В работе [5] дано «ОИ – распределение света в пространстве, воспроизводящее форму и положение светящихся объектов, характер их свечения и оптические свойства среды, в которую они светят». Это трудно принять за определение, потому как сразу возникают вопросы: что же такое распределение света в пространстве? что такое светящиеся объекты? как их определить, не введя некоторой меры излучения? воспроизводит ОИ или нет их форму, характер? что такое оптические свойства среды? Наконец, что такое «светят»? Однако на ВСЕ УКАЗАННЫЕ вопросы легко дать ответы, если определены понятия «луч света» и «яркость». Поэтому в оптике от Альгизена (965–1039) принято определять ОИ как понятие производное от них. Можно привести длинный список учебников, пособий и монографий на эту тему. Сошлюсь только на свою любимую книгу: Борн М., Вольф Э. «Основы оптики» (глава 4 «Геометрическая теория изображений»).

Тут возникает ещё один немаловажный для современной фотометрии аспект. Да, до XX века единственным приёмником света, известным человеку, был глаз. Так и была построена фотометрия П. Бугера. Но уже И. Ламберт в предисловии к его монографии рассуждает о *Lumen* – свете, который мы видим, т. е. об ощущении света, и о *Lux*, относящемуся к объективному приёмнику. Ш. Фабри идёт дальше и определяет фотометрию как раздел оптики, посвящённый энергетике излучений. Сегодня различные и разнообразные приёмники излучения составляют основу нашей цивилизации. Поэтому и теория светового поля может развиваться и развивается как учение об области пространства, исследуемой с точки зрения происходящих в ней процессов переноса энергии излучений. К этому определению А.А. Гершуна добавлю, что любое поле исследуется с помощью пробного приёмника, которым здесь является квадратичный по полю оптический приёмник по Г.В. Розенбергу. По Розенбергу, именно процесс измерения и порождает лучевые представления.

Л.А. Апресян строго математически, исходя из уравнений Максвелла, показывает, как описывать реакцию оптического приёмника в произвольной точке пространства. Для квазиоднородных электромагнитных волн (достаточно общее условие, однако выполняемое не всегда), это приводит к понятиям луча и яркости, как характеристики плотности мощности излучения, переносимой по лучу, и связанной с корреляционной характеристикой поля. Отсюда, как следствие максвелловских уравнений, можно строить всю теорию светового поля, включая его энергетические характеристики, закон обратных квадратов и т. д.

- Как отмечает автор, в этом году исполняется 17 лет плодотворной идеи чётких и особенно нечётких ОИ. Срок в науке немалый. А кто-то, кроме самого Д.В. Бахарева, ссылается на основополагающие работы по ОИ, использовал их для решения каких-либо конкретных задач?

Есть некоторый научный этикет, согласно которому ссылками являются публикации в рецензируемых изданиях. Лучше из списка *ISI*. Можно по системе *SCOPUS*. Обычно при этом стараются исключить самоцитирование. Ещё лучше исключить людей зависимых: сотрудников, аспирантов, магистрантов. Тут надо просто давать библиографические ссылки на статьи в рецензируемых журналах, где цитируются работы автора по ОИ, которые можно однозначно найти в библиотеках, почитать и оценить, что снимает всякие вопросы.

- Наука начинается тогда, когда начинают измерять – утверждал Д.И. Менделеев. Все количественные соотношения светового поля следуют из понятий луча и яркости. Можно ли при помощи понятий ОИ сформулировать хоть одно количественное соотношение, формулу, уравнение?

- Существуют и более мелкие вопросы и сомнения практически по каждому абзацу статьи. Например:

По ходу статьи постоянно используется понятие фотометрической теории светового поля (ФТСП). В заголовке фигурирует понятие оптической теории световых полей (ОТСП). В чём тонкость различия оптической и фотометрической теорий? Моё оптическое образование, во многом основанное на упомянутой монографии Борна и Вольфа, говорит, что ФТСП и ОТСП не противоречат друг другу, но ОТСП – шире, включает и волновые явления. Однако

в статье никак они не обсуждаются, что само по себе порождает вопросы.

Мне представляется весьма спорным утверждение ««Взрывы» квантовой электродинамики и статистической оптики гремели только в головах физиков». А как же бомбы в Нагасаки и Хиросиме, да и как забыть про Чернобыль? Конечно, и квантовые представления в науке утверждались небезболезненно, достаточно упомянуть процессы о еврейских теориях в фашистской Германии (по признанию многих немцев, всё обернулось трагедией и для немецкой культуры), да и в нашей стране сталинским репрессиям не подверглись физики во многом только из-за потребности в бомбе. Так что хотел сказать автор этой хлесткой фразой?

- Не менее загадочно для меня предложение «Пострадали от этих «взрывов» только феноменологические разделы оптики и теории переноса излучения, превратившиеся в абстрактно-математическую схоластику, лишённую адекватного явления качественного содержания». Физическому, адекватному качественному содержанию теории переноса посвящена фундаментальная монография [2], и на основе теории переноса производится прогноз погоды, все наблюдения Земли из Космоса. Вся астрофизика (С. Чандрасекар, В.А. Амбарцумян, В.В. Соболев) строится исключительно на теории переноса – всё, что мы знаем о других планетах и звёздах, есть результат переноса их излучения через собственные атмосферы и космическое пространство. Эти вопросы достаточно активно развивает сегодня в рамках НАСА М.И. Мищенко, с докторской диссертацией которого можно свободно ознакомиться в Интернете – <http://www.giss.nasa.gov/staff/mmishchenko/publications/Thesis.pdf> – на русском (!) языке. Неужели уж и НАСА обезумело и вкладывает деньги в абстрактную схоластику? Отметим, что среди Нобелевских лауреатов по физике существенный процент людей, так или иначе связанных с теорией переноса. Неужели все они схоласты без нечёткого оптического изображения в голове? Если нет, то, что же автор хотел сказать этой фразой?

**В.П. Будак, доктор техн. наук,
профессор, МЭИ (ТУ)**

Ответ автора статьи

Рецензия представляет собой попытку свести ФТСП макроскопического уровня знаний, самого важного для практики расчётов и проектирования осветительных установок, к микроскопической теории переноса электромагнитного излучения [2]. Гидродинамический парадокс ФТСП признаётся, но критиковать «исторически устаревшие» публикации [1, 3] не рекомендуется. Далее с помощью «бритвы Оккама» 90 % содержания рукописи отсекается, её обсуждение и оценка заменяются по сути четырьмя вопросами. Ниже приводятся ответы на них автора в порядке их следования в рецензии.

1. Никакие оптические (видимые, зримые) явления внешнего мира нельзя объяснить, не используя ОИ, поскольку человек зрительно получает 90 % информации о них в виде ОИ конкретных светящихся объектов. Не понятие «ОИ» следует из понятия «луч», а, наоборот, «луч» абстрагирован из «ОИ». Утверждение А.А. Гершуна, что «понятие луча имеет, вероятно, почти такую же давность, как и человеческое слово, по существу не нуждается в пояснении [3, с. 413–414]», феноменологически верно и «исторически устареть» не может. Микроскопическая теория [2] также является результатом углубления наших макроскопических знаний. Чувственно воспринимаемые ОИ конкретных предметов в ней уже не рассматриваются. Рецензия, отсекающая «бритвой Оккама» явления ОИ, показанные на рисунках статьи, наглядно демонстрирует второй парадокс феноменологии света – девственную неосведомленность оптиков и светотехников в начертательной геометрии, т. е. в линейной структуре даже чётких ОИ. Видимо, поэтому в рецензии этот парадокс вообще не упоминается.

2. В [4–7] общее определение и классификация видов ОИ даются впервые в мировой литературе. Как говорится, чем богаты, тем и рады. Термин «распределение» – от глагола «распределять» (кем, чего, кому и где?) – является «одним из основных понятий теории вероятностей и математической статистики» [БСЭ, 3-е изд., Т. 21, 1975, с. 471]. В общем

случае он означает распределение значений любой величины в исследуемой области пространства. Множество этих значений в данной области называют физическим или математическим (в том числе световым) полем [там же, Т. 20, с. 325]. Что такое «свет», «светить», «светимость», «светящийся объект», «светлота», СВЕТОТЕХНИКАМ полагается знать. Для определения формы, положения светящихся объектов и т. д. никакой «меры излучения» не требуется. Все необходимые для светотехнических расчётов исходные данные должны содержаться в проектной документации освещаемых объектов. Геометрия конкретных предметов в освещаемом пространстве в «Основах оптики» Борна и Вольфа не рассматривается. Расчёт световых полей и визуализацию их ОИ можно выполнять для освещённости, яркости, светлоты, коэффициента r_0 и каких угодно величин, что иллюстрирует рис. 1. рукописи. На макроскопическом уровне все они подчиняются единой физико-геометрической структуре поля.

3. В статье указан «Список литературы», необходимой для понимания ее содержания. Ссылок на ОТСП других авторов для этого не требуются.

4. В статье рассматривается не начало, а продолжение ФТСП. Примеры количественных соотношений, формул и уравнений, следующие из ОИ, приводятся в статье «Оптический метод расчета естественного освещения» (Светотехника. – 1996. – № 7. – С. 26–32) и в ранних публикациях, список которых дан на сайте <http://www.bakharev.org>. Автор давно избавился от детской болезни излишней математизации статей. Зачем наводить аналитическую тень на элементарный геометрический плетень? Лучше один раз увидеть рассчитанное и визуализированное ОИ, чем многократно любоваться символическими формулами. Рецензент, видимо, никогда не разрабатывал компьютерные программы, исходные коды которых занимают обычно сотни страниц символических выражений, идентификаторов, комментариев и т. п.

У рецензента «существуют и более мелкие вопросы и сомнения к автору практически в каждом абзаце статьи. Например ... ». Ниже даны ответы автора на примеры этих мелких вопросов и сомнений:

1. ФТСП в настоящее время представляют ГТСП и ОТСП. Первая является гносеологическим парадоксом, а вторая соответствует феномену световых полей.

2. По образному выражению Г.В. Розенберга, «взрываю» в науке в статье противопоставляются «тишина и покой» в обыденном сознании людей: «как видел мир человек доисторический, так его видят и наши современники». Очевидно, что автор имел в виду совсем не то, о чем говорится в паре «мелких вопросов и сомнений».

В музыке есть такое выражение – «медведь (или слон) на ухо наступил». Таких людей мало, большинство любит и умеет петь. К сожалению, людей «без нечеткого оптического изображения в голове» подавляющее большинство. Они даже четкие ОИ окружающего мира не могут изобразить карандашом на бумаге. Толковать таким людям о размытых ОИ, структуру (рисунок) которых образуют расходящиеся от светящихся объектов лучи, пересекающие контуры диафрагм различной формы, очень трудно, в особенности, если они не желают этого видеть и слышать. «Рецензия» – наглядный пример такой схоластики, наносящей ущерб феноменологии света. Не случайно А. Эйнштейн с присущим ему юмором переформулировал принцип «бритвы Оккама»: «Всё следует упрощать до тех пор, пока это возможно, но не более того», а известный российский математик и философ Ю.А. Шрейдер прямо говорил, что «бритва Оккама» годна лишь для духовной кастрации».

В рецензии отсутствуют обсуждение и доказательства ошибочности рассматриваемых в статье зримых фактов ОИ. Поэтому автор не может воспринять этот реферат о невидимой, микроскопической теории [2] как настоящую критику своей статьи.

Д.В. Бахарев