



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 87 за 2022 г.

ISSN 2071-2898 (Print)  
ISSN 2071-2901 (Online)

[С.Г. Поздняков](#), [С.В. Ершов](#),  
[А.Г. Волобой](#)

Гибридный подход к подбору  
состава автомобильной  
краски желаемого цвета на  
основе нейронных сетей и  
моделирования света

Статья доступна по лицензии  
[Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Поздняков С.Г., Ершов С.В., Волобой А.Г. Гибридный подход к подбору состава автомобильной краски желаемого цвета на основе нейронных сетей и моделирования света // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2022. № 87. 17 с.  
<https://doi.org/10.20948/prepr-2022-87>  
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2022-87>

**Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
имени М.В. Келдыша  
Российской академии наук**

**С.Г. Поздняков, С.В. Ершов, А.Г. Волобой**

**Гибридный подход к подбору состава  
автомобильной краски желаемого цвета  
на основе нейронных сетей  
и моделирования света**

**Москва — 2022**

*Поздняков С.Г., Ершов С.В., Волобой А.Г.*

**Гибридный подход к подбору состава автомобильной краски желаемого цвета на основе нейронных сетей и моделирования света**

Современные автомобильные краски имеют сложную структуру, и моделирование их оптических свойств является достаточно сложной задачей. Обратная задача – подбор состава краски по ее внешнему виду – наиболее востребована в практическом применении. В статье проанализированы недостатки популярных математических методов, в т.ч. использованных ранее авторами, и предложен гибридный подход на основе глубокого обучения нейронной сети и моделирования распространения света в многослойной краске. Нейросетевой алгоритм хорошо решает задачу для пигментов и красок, на которых он обучен, но неустойчив для новых пигментов. В этом случае моделирование краски помогает найти приемлемый результат. Математическая модель здесь доставляет лишь функциональную форму уравнений в вариациях, а величины всех функций получаются измерениями. Этих измерений немного, и они сводятся в библиотеку пигментов для дальнейшего использования.

**Ключевые слова:** моделирование распространения света, рассеяние света частицами, краски, BRDF, измерения, минимизация отклонения, метод сложения-удвоения

*Sergey Georgievich Pozdnyakov, Sergey Valentinovich Ershov, Alexey Gennadievich Voloboy*

**Hybrid approach to design of the composition of automotive paint to match the desired color based on neural networks and lighting simulation**

Modern automotive paints have a complex structure, and modeling their optical properties is a challenge. The inverse problem - the design of the paint composition according to its appearance - is most in demand in practical application. The shortcomings of popular mathematical methods, including previously used by the authors, are analyzed in the paper. A hybrid approach based on deep learning of a neural network and modeling of light propagation in a multilayer paint is proposed. The neural network algorithm solves the problem well for the pigments and paints on which it is trained, but is unstable for new pigments. In this case paint simulation helps to find an acceptable result. The mathematical model here provides only the functional form of the equations in variations, and the values of all functions are obtained by a few measurements which form a pigment library for future use.

**Key words:** lighting simulation, light scattering by particles, paints, BRDF, measurements, minimization of discrepancy, adding-doubling method.

Работа поддержана грантом РФФИ 20-01-00547.

## 1. Введение

Современные автомобильные краски имеют сложную структуру и состоят из множества пигментов различной природы, таких как интерференционные пластинки, зеркальные чешуйки и обычные, диффузные пигменты. Для красок внешний вид является главной характеристикой, а он проявляется через человеческое восприятие объективных оптических свойств: цвета, яркости (коэффициента отражения), глянцевого, текстуры (пространственной неоднородности) и пр. Проблеме правильного отображения внешнего вида красок посвящено множество научных работ. Например, авторы статей [1-3] предлагают модели визуализации, основанные на анализе сфотографированных изображений или результатов измерений реальных образцов красок.

Другой подход – это моделирование оптических свойств многослойных красок со сложной микроструктурой с целью воспроизведения их внешнего вида. Такое моделирование является достаточно сложной задачей, и, как мы покажем в дальнейшем, не всегда обеспечивает требуемую точность. В Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН более 20 лет ведутся работы по моделированию распространения света в автомобильных красках. В рамках этой деятельности была разработана модель краски, которая состоит из плоскопараллельных однородных слоев [4]. Такая модель рассеяния основана на статистическом подходе (лучевое уравнение переноса) и аккуратно описывает взаимодействие света внутри краски, включая радужные и перламутровые эффекты. Эта модель была впоследствии использована и развита в работах [5-7].

Следует отметить, что одной из наиболее практически востребованных задач является подбор состава краски, т.е. выбор необходимых пигментов и их концентраций, для обеспечения заданных оптических свойств, а именно цвета при разных углах освещения и наблюдения. Наиболее часто подбор краски необходим при ремонтных кузовных работах, так как изначальный состав краски почти всегда неизвестен. Более того, даже если состав краски известен, то внешний вид окрашенной поверхности может изменяться со временем под воздействием атмосферных явлений, реагентов, применяемых на дорогах. В результате внешний вид поверхности может отличаться от начального. Попытки найти автоматическое решение для этой амбициозной задачи предпринимались различными коллективами и насчитывают уже не одно десятилетие [8-11]. Нами также были предприняты попытки решить задачу определения состава краски по ее внешнему виду [12, 13].

Предложенная модель оказалась достаточно удачной, что позволило успешно выполнить несколько проектов для компаний Toyota и Nippon Paint Corporation. Тем не менее в процессе работы стало ясно, что классический расчет состава краски «с нуля», основываясь на физической модели взаимодействия света с краской и данных о физических свойствах пигментов, как правило, не достигает столь высокой точности, при которой глаз не различает вычисленный и заданный цвета. Позднее нами были разработаны

различные «компромиссные» методы, соединяющие расчеты с пробными измерениями, интерполяцией по базам данных и пр. Эти методы достигают значительного успеха и часто оказываются достаточными для практических применений. Однако и тут имеется ряд нерешенных случаев. Они-то и составляют конкретную задачу данного проекта.

Безусловным прорывом выглядит подход [14, 15], реализованный компанией «Два стахановца», являющейся отечественным производителем красок. Они разработали программное обеспечение, основанное на Deep Learning и позволяющее подобрать необходимый состав краски по измеренным данным. На вход нейросети подаются требуемые оптические характеристики измеренной окрашенной поверхности, и комбинация пигментов подбирается из существующей базы данных. Результат показывает совпадение цветов в 80-90% случаях, что очень хорошо. Однако нейросеть знает только те пигменты, на которых она была обучена. При изменении производителя красок или пигментов программа подбора состава краски может выдать неверный результат или вообще не завершить процесс подбора. А ее обучение под новые пигменты и краски требует 2-3 года экспериментов с производством и изменением образцов красок.

В данной статье предлагается новый гибридный подход, который позволит дополнить существующий нейросетевой алгоритм элементами моделирования распространения света в многослойных красках. Это даст возможность основному алгоритму быстро адаптироваться к ситуации новых пигментов и красок, которые не участвовали в процессе его обучения.

## **2. Задача подбора краски по ее внешнему виду**

Как уже было отмечено выше, задача автоматического подбора краски является весьма амбициозной. Вообще говоря, такая задача при наличии достаточно большого количества доступных пигментов может быть решена совсем без автоматизации, вручную, “методом проб и ошибок” путем изготовления достаточного количества пробных красок и сравнения отражений “эталонной” и пробных красок. Однако ручной подбор трудоемок, долгов и дорог. Поэтому постоянно предпринимаются попытки автоматизировать процесс подбора с помощью тех или иных компьютерных вычислений.

В идеале желательно было бы определить требуемый пигментный состав краски с помощью компьютерных вычислений “за один шаг” и полностью исключить изготовление нескольких пробных вариантов. К сожалению, такой подход едва ли реализуем. Как правило, физические свойства используемых пигментов неизвестны (составляют коммерческую тайну производителя), либо измерение таких свойств – слишком сложная задача.

В последнее время была сделана попытка автоматизировать процесс подбора с помощью нейронных сетей [14]. Однако и здесь автоматизация сталкивается с большими трудностями. Хорошо известно: чтобы удовлетворительно обучить нейронную сеть, следует использовать достаточно

большую базу данных, которая в качестве входных параметров использует наименования пигментов, их концентрации в известных образцах и отражение света этими образцами в той или иной форме. Однако со временем некоторые пигменты больше не производятся, появляются новые, иногда свойства пигментов с одним и тем же наименованием изменяются. Вероятно, причина такого поведения свойств пигментов как-то связана с их производством и/или применением. В результате базу данных приходится постоянно модифицировать, переобучать нейронную сеть, а возможно, и изменять внутреннюю структуру сети.

Также возможна ситуация, когда и использованные пигменты, и их концентрации неизменны, но при некоторых условиях освещения внешний вид красок будет заметно отличаться. Причина такого отличия может быть вызвана различием в технологии нанесения и высыхания краски. Учет таких различий также может потребовать соответствующих модификаций нейронной сети.

Для корректного моделирования распространения света в краске и предсказания ее внешнего вида необходимо знание свойств доступных пигментов с достаточной точностью. Свойства пигментов могут быть также получены с помощью измерений способом, описанным далее. В идеале, если свойства пигментов известны или могут быть хорошо измерены с достаточной точностью, то искомый оптимальный состав пробной краски (необходимые пигменты и их концентрации) будет получен с помощью только компьютерных вычислений.

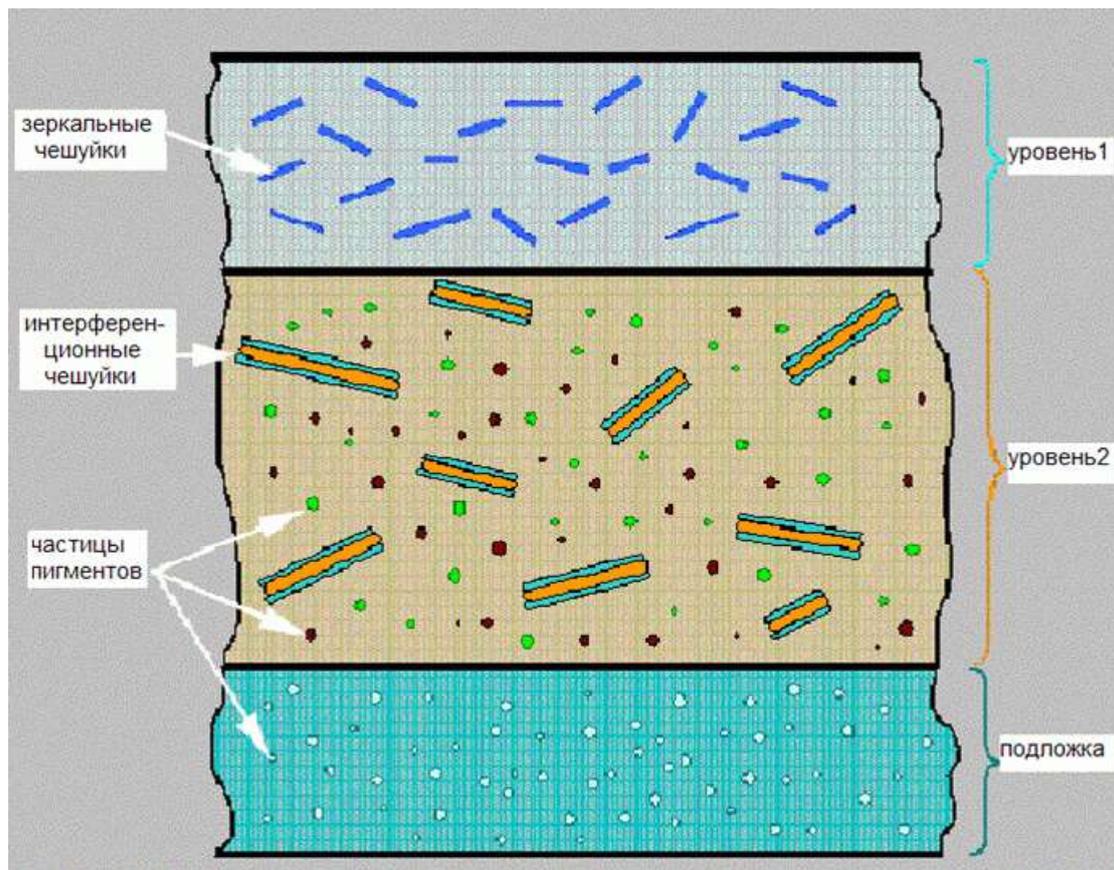
Следует отметить, что математическая модель красящего слоя использует упрощения, которые касаются структуры красящего слоя: например, однородность в направлении, перпендикулярном его плоскости. В реальности эти предположения выполняются с некоторой точностью. При необходимости описываемый подход предполагает изготовление нескольких пробных образцов и соответствующие измерения их отражения. С помощью уточненных данных отличие между требуемыми и полученными свойствами может быть значительно уменьшено.

В настоящей работе предлагается способ автоматизации подбора состава красок, который использует достаточно точную математическую процедуру моделирования взаимодействия освещения с образцом пробной краски.

### **3. Математическая модель красящего слоя и процедура моделирования**

Разработанная нами модель краски состоит из плоскопараллельных однородных слоев [4, 12, 13]. Каждый слой представляет собой прозрачный лак со взвешенными в нем пигментными красящими частицами и интерференционными чешуйками, ответственными за «искрение» (Рис. 1). В процессе вычислений данный слой краски расщепляется на множество тонких слоев таким образом, чтобы внутри каждого подслоя можно было бы

пренебречь многократным рассеянием. Предполагается, что все события рассеяния света происходят в разных подслоях. Это позволяет описывать рассеяние (отражение и пропускание) в тонких слоях в аналитическом виде. Оптические свойства толстого слоя краски вычисляются с помощью результатов для тонких подслоев методом удвоения [16]. Такая модель рассеяния основана на статистическом подходе и аккуратно описывает взаимодействие света внутри краски, включая радужные и перламутровые эффекты.



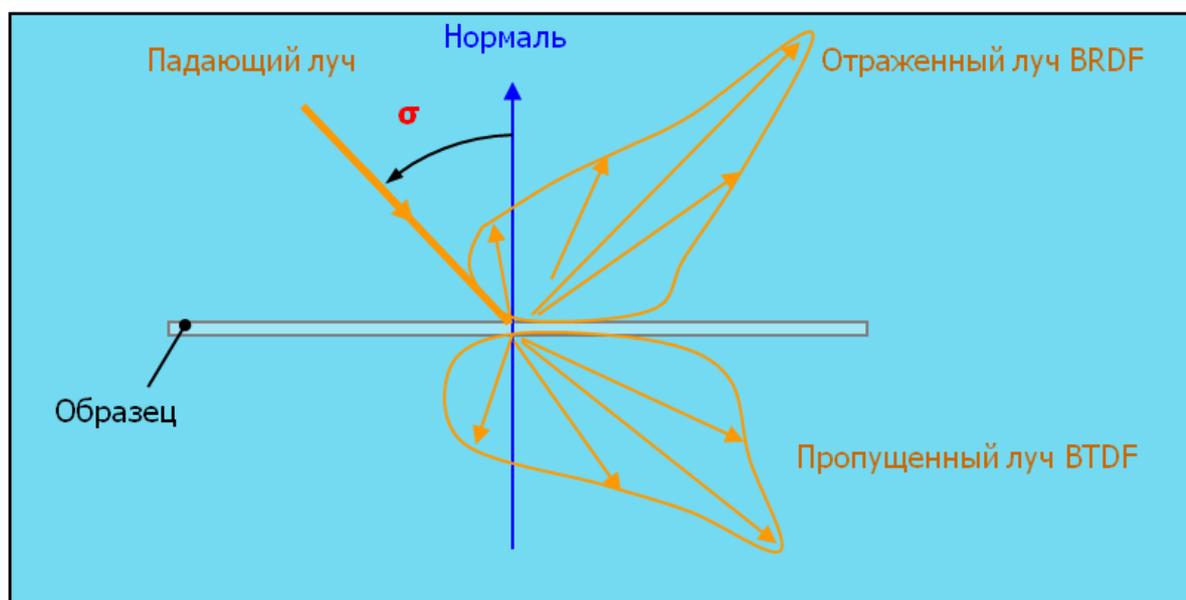
**Рис. 1.** Поперечное сечение используемой модели краски.

Вычисления с помощью метода сложения–удвоения [16, 17] существенно ускоряет расчет по сравнению с классической трассировкой лучей методом Монте–Карло. Однако предполагается, что концентрация пигментов постоянна в направлении, перпендикулярном поверхности слоя. Если концентрация пигментов вдоль указанного направления непостоянна, то в расчетах все еще можно использовать идею метода сложения–удвоения, но расчеты становятся заметно сложнее, скорость существенно падает и становится близкой к скорости классической лучевой трассировки (необходимо заметить, что задачи лучевой трассировки прекрасно распараллеливаются).

#### 4. Представление оптических свойств красящего слоя

Для сравнения отражений пробного и требуемого красящих слоев требуется адекватное представление их оптических свойств. В противном случае процедура подбора может никогда не сойтись к требуемому значению. Нам известен случай, когда отражение подобранной краски при обычном дневном освещении достаточно хорошо совпадает с желаемым, «эталонным» отражением, однако при закатном освещении было прекрасно видно, что фрагмент, окрашенный подобранной краской, заметно темнее эталонного. В этом случае различие вызвано тем, что отражения эталонного и подобранного красящих слоев достаточно сильно отличаются в длинноволновой (красной) области видимого спектра. Известно, что максимум чувствительности человеческого глаза находится в зеленой области (длина волны  $\sim 550$  нм). При обычном дневном освещении, спектр которого приближенно описывается спектром источника D65, интенсивность в зеленой области достаточно велика. Спектр закатного освещения смещается в красную область, где чувствительность человеческого глаза заметно снижается. В результате внешний вид обеих красок при дневном освещении будет совпадать, а при закатном освещении — заметно отличаться.

Для того чтобы избежать возникновения таких ситуаций, необходимо использовать наиболее общее и полное описание отражения красящих слоев при различных условиях освещения. Такое описание задается с помощью общего вида Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF). В общем случае изотропная BRDF — это функция четырех аргументов, описывающая отражение поверхности для всевозможных различных углов падения света и различных направлений наблюдения в спектральном представлении (рис. 2).



**Рис. 2.** Функция, описывающая яркость отраженного (BRDF) и пропущенного (BTDF) света.

Если краска нанесена на прозрачную подложку, то пропускание красящего слоя описывается с помощью Bidirectional Transmittance Distribution Function (BTDF, рис. 2). В некоторых случаях применение BTDF в расчетах или необходимо (как для метода сложения–удвоения), или заметно упрощает эти расчеты. Описание оптических свойств красящего слоя с помощью BRDF и BTDF позволяет достаточно точно вычислять различие между отражениями подобранных и эталонной красок. Возможно, что при достижении желаемого согласия в оптических свойствах красок их пигментные составы будут заметно различаться.

## 5. Определение физических свойств пигментов

Применяемая нами модель красящего слоя основана на лучевом уравнении переноса. Естественно, описание взаимодействия света с красящим слоем при помощи уравнения переноса является приближенным. Точные условия применимости такого описания сформулировать достаточно трудно. Следует отметить, что необходимым является следующее условие: все размеры объектов, участвующих в процессе распространения света в красящем слое, должны быть много больше длины волны излучения.

Как правило, реальные пигменты состоят из различных частиц, размеры которых могут быть меньше или сравнимы с длиной волны. Но и в этом случае уравнение переноса может быть применимо. Действительно, когерентность освещения невелика, и если внутри красящего слоя расстояния между ближайшими зернами пигмента больше длины волны, то освещение взаимодействует с зернами пигмента независимо. При этом взаимодействие освещения с отдельным пигментным зерном с достаточной точностью может быть описано фазовой функцией и коэффициентами рассеяния и поглощения. Естественно, сами фазовая функция и коэффициент поглощения определяются волновой природой взаимодействия.

В целом в рамках лучевого уравнения переноса процесс распространения освещения в красящем слое описывается достаточно просто. Реальный красящий слой заменяется абстрактной субстанцией, в которой распространение освещения описывается случайным процессом распространения лучей (или “фотонов”). При этом в процессе распространения траектория луча состоит из отрезков прямых, образующих ломаную линию. Длины каждого отрезка являются случайными величинами, разыгрываемыми в соответствии с физическими свойствами пигмента и концентрацией его зерен. После перемещения луча вдоль данного отрезка разыгрывается его дальнейшая судьба: либо рассеяние, либо поглощение (“русская рулетка”). Если происходит рассеяние, то новое направление движения также разыгрывается случайно в соответствии с фазовой функцией.

Как уже было сказано выше, физические свойства пигментов, как правило, неизвестны. Поэтому возникает задача их определения с помощью соответствующих измерений. Одним из способов таких измерений является

измерение рассеяния (отражение, пропускание и поглощение) света тонким красящим слоем, содержащим пигмент в достаточно малой концентрации. Для того чтобы избежать эффектов, связанных с полным внутренним отражением, прозрачная пластинка, на которую нанесен красящий слой, иммерсионно соединяется с двумя прозрачными полусферами. Коэффициент преломления материала полусфер должен быть достаточно близок к коэффициентам преломления лака, образующего краску, и прозрачной пластинки. При этом освещение пластинки и регистрация отраженного и прошедшего излучения производится в направлениях, перпендикулярных к поверхности полусфер. Таким образом измеряются отражение и пропускание освещения пластинкой за вычетом отражений на поверхностях полусфер, которые могут быть очень легко вычислены.

Такой способ определения физических свойств пигментов имеет ряд недостатков. Во-первых, он достаточно сложен с точки зрения измерений: совсем не просто проводить измерения для “конструкции” из пластинки и двух полусфер. Более того, не всякая измерительная установка позволяет сделать такие измерения с достаточной точностью. Во-вторых, что даже более существенно, физические свойства, измеренные при малой концентрации пигмента, могут быть не слишком точны при больших концентрациях.

Существует способ определения физических свойств пигментов, использующий решение обратной задачи. Он включает в себя измерение BRDF и BTDF пластинки с красящим слоем при необходимой концентрации пигмента и моделирование отражения и пропускания пластинкой освещения в рамках лучевого уравнения переноса. Как и ранее, физические свойства пигмента – это коэффициенты рассеяния и поглощения и фазовая функция рассеяния. Если каким-либо “разумным” способом задать эти свойства, то соответствующие BRDF и BTDF могут быть вычислены либо простой лучевой трассировкой, либо методом сложения–удвоения. Рассматривая физические свойства как неизвестные, они могут быть найдены с помощью решения обратной задачи, т.е. подгонкой рассчитанных BRDF и BTDF к измеренным. Для этого задается целевая функция, определяемая различием измеренных и рассчитанных BRDF и BTDF. А подгонка сводится к нахождению минимума этой целевой функции за счет подбора неизвестных физических свойств пигмента. Поиск минимума целевой функции может быть осуществлен с помощью простейшего нелинейного симплекс-метода (метод Мелдера–Нида [18]), который не требует вычисления производных целевой функции. Если возможно вычисление производных от BRDF и BTDF как функций неизвестных физических свойств, то можно применять более “мощные” методы, например, метод сопряженных градиентов.

Сделаем одно замечание. При нахождении свойств пигментов помимо коэффициентов также необходимо найти фазовую функцию. Это означает, что к физическим свойствам будут относиться и параметры, описывающие фазовую функцию. Основываясь на нашем опыте, можем сказать, что

достаточно удобно выбирать двухпараметрическую фазовую функцию следующего вида:

$$\Phi(\theta) = \frac{C}{(1 - 2g \cos \theta + g^2)^\Gamma},$$

здесь  $C$  – нормировочный коэффициент,  $\theta$  – угол рассеяния,  $\Gamma, g$  – параметры,  $0 < g < 1$ . Функциональный вид фазовой функции напоминает вид индикатрисы Хенни–Гринштейна [19], для которой  $\Gamma = 3/2$ , а параметр  $g$  часто

называется параметром асимметрии. Данная фазовая функция применима в случае, когда пигментные зерна не имеют выделенной ориентации. Наш опыт показывает, что для параметризации фазовой функции одного параметра  $g$  недостаточно.

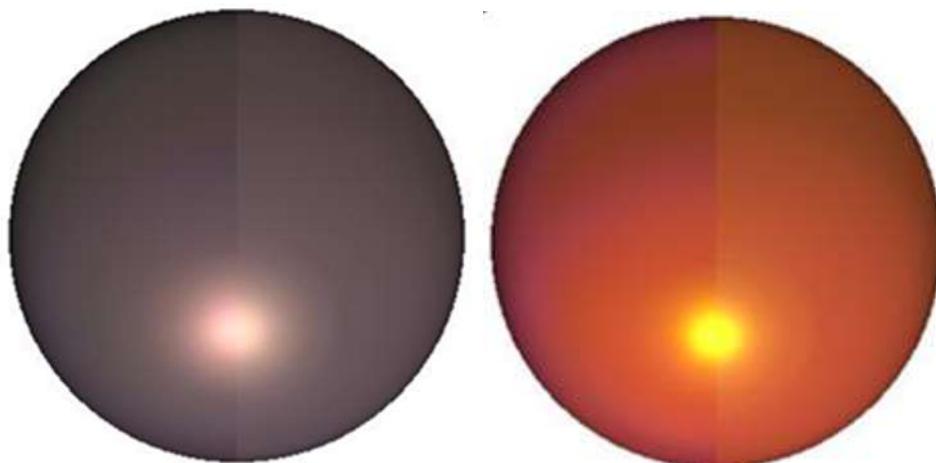
## **6. Примеры применения существующей модели краски к задаче подбора желаемого цвета**

Как уже было сказано ранее, предложенная многослойная модель краски оказалась достаточно удачной, что позволило успешно выполнить несколько проектов. Кратко опишем процедуру подбора красок с помощью такой модели в идеальном случае.

Пусть задана эталонная (требуемая) BRDF. Нам известны все физические характеристики лака. Существует достаточное количество пигментов, и предполагается, что, используя некоторые из них, можно подобрать краску, BRDF которой будет достаточно близка к эталонной. Далее, считается, что при необходимых концентрациях пигментов точно работает уравнение переноса и нам с достаточной точностью известны необходимые физические параметры этих пигментов. Кроме этого, предполагается, что при необходимых концентрациях эти параметры постоянны. В этом случае для некоторого набора пигментов при их заданных концентрациях описанная модель вполне работоспособна, а вычисление BRDF и BTDF красящего слоя может быть проведено методом сложения–удвоения с большой скоростью.

Далее можно задать целевую функцию, которая будет определяться различием между текущей и эталонной BRDF. Перебирая различные комбинации пигментов и находя глобальные минимумы целевой функции как функции концентраций этих пигментов, можно подобрать рецепт краски, чей BRDF достаточно близок к желаемому. Как и в предыдущем пункте, поиск минимума целевой функции может быть осуществлен с помощью метода Мелдера–Нида. Отметим, что метод сложения–удвоения нетрудно “усовершенствовать”. После этого он будет способен вычислять не только текущие BRDF и BTDF, но и их первые производные по координатам пигментов. В этом случае для поиска минимумов целевой функции можно

применить градиентные методы. Например, метод скорейшего спуска или более продвинутый метод сопряженных градиентов.



**Рис. 3.** Визуализация измеренной (левая половина сферы) и рассчитанной (правая половина) перламутровых красок.

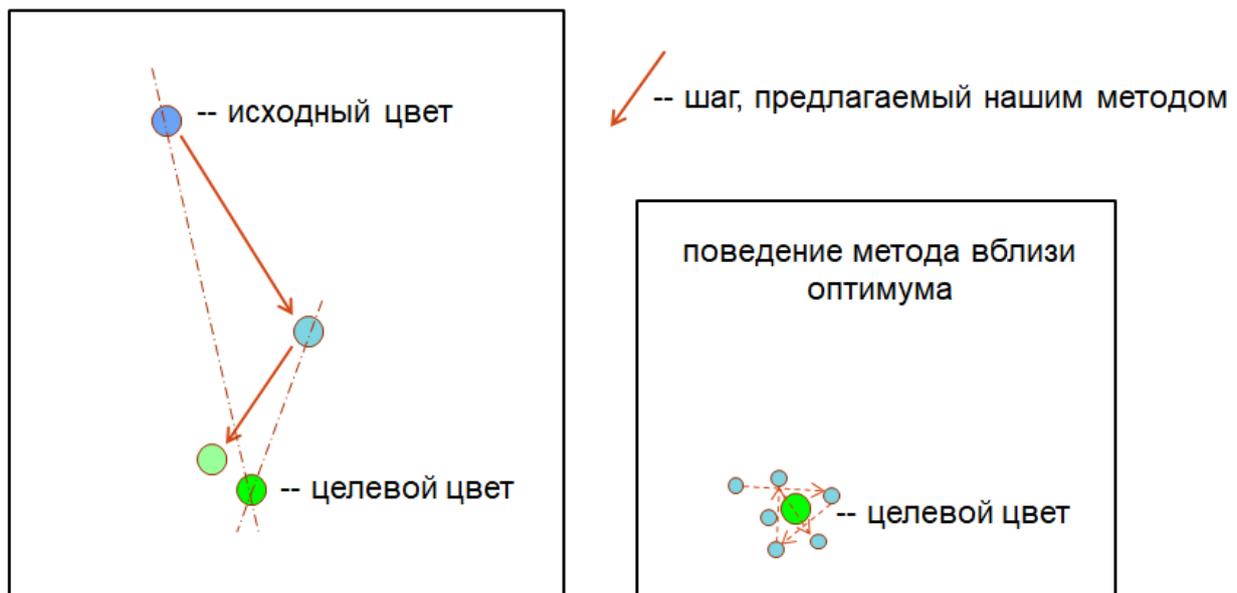
В процессе работы стало ясно, что расчет состава краски, основанный на физической модели взаимодействия света с краской и данных о физических свойствах пигментов, как правило, не достигает необходимой точности, при которой глаз не различает вычисленный и измеренный цвета. На рис. 3 показаны изображения сфер, на левую половину которых назначена измеренная BRDF краски, а на правую — рассчитанная нашим методом. Граница между ними хорошо видна. Причина различия в первую очередь связана с тем, что не совсем верно предположение о том, что действующие физические свойства пигментов не зависят от концентрации. Например, возможна ситуация, что при достаточно высокой концентрации зерна расположение зерен пигментов нельзя считать независимым.

## **7. Идея предлагаемого метода, «Метод спуска»**

Используемый в нашей модели метод сложения–удвоения [16, 17] предполагает прежде всего, что частицы пигмента распределены однородно и независимо. В случае их агглютинации и неоднородностей возникают существенные неточности [20]. Впрочем неоднородность неприемлема почти для всех методов оптического моделирования. Кроме того, волновые эффекты между частицами должны быть пренебрежимо малы. Для моделирования необходимы точные и достаточно подробные данные обо всех пигментах. Если частицы анизотропны (как, например, слюдяные или алюминиевые чешуйки), то необходимы еще и данные об их ориентации в итоговой, высохшей краске. Практический опыт нашей исследовательской группы показывает, что данные такого качества и объема обычно недоступны. Измерить их с требуемой

точностью для сотен пигментов, используемых в автомобильных красках, — задача исключительно дорогая и на практике недостижимая.

Вместе с тем используемая вычислительная модель краски крайне правдоподобна и достаточно верно описывает все происходящие там процессы. Поэтому, хотя точность вычисления по ней целевой BRDF краски «с нуля» может оказаться недостаточной, но эту модель можно применить для вычисления требуемого изменения цвета, т.е. некоторой «дельты», шага изменения состава краски. Именно этот шаг требуется программе подбора краски, основанной на глубоком обучении [14]. Повторим, что эта программа с высокой точностью находит рецептуру требуемой краски в пространстве красок и пигментов, на которых ее обучили. В то же время она не способна понять, куда дальше двигаться за пределами этого пространства, и просто останавливается, не достигнув результата. В этом случае необходимый шаг изменения состава краски может быть вычислен с помощью нашей модели.



**Рис. 4.** Иллюстрация предлагаемого «метода спуска»; слева — начальные шаги, справа — завершающий этап интерполяции.

При такой постановке задачи вариация BRDF может быть предсказана неидеально точно, однако этого будет достаточно, чтобы решить, какие пигменты и в каких пропорциях добавлять. Краска с варьированным составом будет уже лучше соответствовать желаемому цвету, но, возможно, точно его не воспроизведет. В этом случае, как и допускается постановкой задачи, мы делаем следующий шаг «метода спуска» и т.д. (рис. 4). Пока мы находимся достаточно далеко от желаемого цвета, небольшая ошибка в направлении вектора шага допустима; она просто замедляет сходимость, не влияя на точность. Однако вблизи оптимума даже небольшие ошибки в направлении

могут приводить к тому, что вместо сходимости к минимуму траектория будет «вращаться» вокруг него. В этом случае цвета для всех использованных при сходимости составов передаются интерполяционной процедуре, и если мы перед тем достаточно долго крутились около минимума, то этих точек достаточно, чтобы интерполяция по ним могла обеспечить финальный шаг (рис. 4, правый).

## 8. Вариация BRDF. «Метод пробников»

Описанный выше метод вычисления вариации BRDF («метод спуска») построен на основе дифференцирования уравнений метода сложения. Однако в этом случае туда войдет «опорный» BRDF исходной композиции, который будет вычислен с ошибкой. Что еще хуже, на вход потребуются многочисленные высокоточные данные по всем пигментам, в том числе и неварьируемым, которые взять неоткуда. Поэтому необходимо построить такую математическую модель, основанную на дифференцировании метода сложения, чтобы BRDF исходной краски туда входил как измеренный параметр. Это значительно повысит точность метода.

Упрощенной реализацией этого подхода с увеличенной ролью измерений является «метод пробников». Суть его такова. Если в исходной краске немного изменить концентрацию  $D$  некоего пигмента  $X$  на  $\delta D$ , то изменение яркости краски (BRDF при выбранном направлении освещения и наблюдения)  $\delta L$  окажется линейно:

$$\delta L = \delta D (\mathfrak{C}_{refl} F + \mathfrak{C}_{transm} G + \mathfrak{C}_{ext} H), \quad (1)$$

где  $F$ ,  $G$ ,  $H$  есть характеристики исходной краски, а  $\mathfrak{C}_{refl}$ ,  $\mathfrak{C}_{transm}$ ,  $\mathfrak{C}_{ext}$  – это цвета данного пигмента на отражение, на пропускание и экстинкция.

Они могут быть измерены следующим образом: изготавливаем краску только с пигментом  $X$  в невысокой концентрации  $D_0$ , наносим ее на прозрачную пластинку и измеряем яркость (цвет)  $R_X$  диффузного отражения, диффузного пропускания  $T_X$ , и, наконец, прямого (без рассеяния!) пропускания  $\tau_X$ . Тогда

$$\begin{aligned} \mathfrak{C}_{refl} &= \frac{R_X}{D_0}, \\ \mathfrak{C}_{transm} &= \frac{T_X}{D_0}, \\ \mathfrak{C}_{ext} &= \frac{1 - \tau_X}{D_0}. \end{aligned}$$

Для некоторых пигментов цвет может зависеть от направления (освещения и наблюдения), в этом случае метод придется усложнить. Мы пока пропустим этот случай. Итак, по некоторым несложным измерениям мы можем получить «собственные цвета» пигмента, и тогда вариация BRDF имеет вид (1). При этом

$F$ ,  $G$ ,  $H$  нам неизвестны (непосредственно измерить их весьма сложно), но они являются свойствами исходной краски и не зависят от того, какой пигмент  $X$  варьировался.

Поэтому мы можем измерить их косвенно, добавив к исходной композиции немного пробника  $W$ . В качестве него можно использовать любой в принципе пигмент, но лучшие результаты получатся, если он

1. Того же базового типа, что и  $X$ . Типов таких всего три: это effect pigments, или flakes (чешуйки); это solid, или diffuse pigments типа мелких зерен  $TiO_2$ ; и это, наконец, «чернила», т.е. пигменты с поглощением, но без рассеяния.
2. Он «белый», т.е. его базовые цвета имеют примерно плоскую спектрограмму.

Проведя измерения вариации яркости краски для 3 таких пробников  $W_1$ ,  $W_2$  и  $W_3$  с известными «собственными цветами», мы из (1) находим  $F$ ,  $G$ ,  $H$ . И теперь уже можем вычислить, как изменится цвет при добавлении любого пигмента  $X$  в любой (но малой) концентрации.

Заметим, что в силу линейности для малых вариаций изменение  $\delta L$  при прибавлении двух пигментов  $X$ ,  $Y$  вычисляется по примерно той же формуле:

$$\delta L = \left( \delta D^{(X)} \mathfrak{C}_{refl}^{(X)} + \delta D^{(Y)} \mathfrak{C}_{refl}^{(Y)} \right) F + \left( \delta D^{(X)} \mathfrak{C}_{transm}^{(X)} + \delta D^{(Y)} \mathfrak{C}_{transm}^{(Y)} \right) G + \left( \delta D^{(X)} \mathfrak{C}_{ext}^{(X)} + \delta D^{(Y)} \mathfrak{C}_{ext}^{(Y)} \right) H.$$

Для слишком большого числа новых пигментов точность будет падать, но для двух, а скорее всего и трех, точность все еще будет достаточной.

Перебирая все имеющиеся в базе пигменты, мы выбираем из них тот, для которого  $\delta L$  лежит ближе всего к разности желаемого и исходного цветов краски. Выбрав добавляемые пигменты, вычисляем теперь в предположении линейности по нашим формулам их концентрации, при которых цвет варьируемой краски будет максимально близким к желаемому. Если концентрации оказались слишком высоки, то ограничиваем их, так как сделать сразу слишком большую вариацию состава краски рискованно.

Изготавливаем краску предсказанного состава и измеряем ее. Первый шаг завершен. Возможно, точного попадания в требуемый цвет не будет. Как же делать следующий шаг? В принципе, можно полностью повторить процедуру, введя пробники в выбранную на первом шаге рецептуру. Но это достаточно трудоемко и долго. Делать так на каждом шаге неэффективно. Поэтому можно воспользоваться тем, что на самом деле изменение цвета краски при введении пигмента  $X$  не в точности линейно его концентрации, но квадратично. Так же, как и ранее, это верно для небольших изменений композиции. Поэтому теперь мы изготавливаем краску с двукратным (или половинным) изменением концентрации  $X$  по сравнению с предсказанным на первом шаге. В данном случае нам уже не нужны коэффициенты  $F$ ,  $G$ ,  $H$ . По данным для половинного,

одинарного и двукратного изменения концентрации мы вычисляем зависимость  $L(D)$  и находим  $D$ , при котором (среднее по спектру!) отклонение от желаемого  $L$  минимально.

## 9. Заключение

Нами предложен гибридный подход, совмещающий нейросетевой алгоритм подбора краски по ее внешнему виду и моделирование распространения света в многослойной модели краски. В результате реализации данного подхода будут апробированы предложенные методы, выявлены их ограничения и область применения. Методы гарантированно определяют первые, самые трудные для существующего подхода на основе Deep Learning шаги добавления нового пигмента. Кроме разработки математических и вычислительных основ предложенного метода предполагается провести анализ имеющихся красок, измерение соответствующих образцов и результатов подбора их состава.

Конечной целью работы является создание компьютерного измерительно-вычислительного комплекса, способного вычислять состав краски по ее внешнему виду в автоматическом режиме. Использование двух подходов, нейросетевого алгоритма и компьютерного моделирования распространения света позволит достичь высокой точности как для известных пигментов и красок, так и для новых, неизвестных пигментов новых производителей.

## Список литературы

1. M. Rump, G. Müller, R. Sarlette, D. Koch, R. Klein, Photo-realistic Rendering of Metallic Car Paint from Image-Based Measurements, *Computer Graphics Forum*, 27(2), 2008, pp. 527-536.
2. T. Kneiphof, R. Klein, Real-time image-based lighting of metallic and pearlescent car paints, *Computers & Graphics*, Vol. 105, 2022, pp. 36-45, doi:10.1016/j.cag.2022.04.009
3. D.B. Kim, M.K. Seo, K.Y. Kim, K.H. Lee, Acquisition and representation of pearlescent paints using an image-based goniospectrophotometer, *Optical Engineering*, 49(4), 043604, 2010. doi:10.1117/1.3407431
4. S. Ershov, K. Kolchin, K. Myszkowski, Rendering pearlescent appearance based on paint-composition modeling. // *Computer Graphics Forum*, 20(3), 2001, pp. 227-238.
5. W. Jakob, E. d'Eon, O. Jakob, S. Marschner, A comprehensive framework for rendering layered materials, *ACM Transactions on Graphics*, 33(4), 2014, Article No. 118, pp. 1–14. doi:10.1145/2601097.2601139
6. L. Belcour, Efficient Rendering of Layered Materials using an Atomic Decomposition with Statistical Operators. *ACM Transactions on Graphics*, 37(4), 2018, pp.1. doi:10.1145/3197517.3201289

7. J. Guo, Y.J. Chen, Y.W. Guo, J.G. Pan, A physically-based appearance model for special effect pigments. *Computer Graphics Forum*, 37(4), 2018, pp. 67–76.
8. S. Ergun, S. Onel, A. Ozturk, A general micro-flake model for predicting the appearance of car paint, *EGSR'16: Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering: Experimental Ideas & Implementations*, 2016, pp. 65–71.
9. T. Golla, R. Klein, Interactive interpolation of metallic effect car paints, *EG VMV'18: Proceedings of the Conference on Vision, Modeling, and Visualization*, 2018, pp. 11–20. doi:10.2312/vmv.20181248
10. H. Wu, J. Dorsey, H. Rushmeier, Physically-based interactive bi-scale material design, *ACM Transactions on Graphics*, 30(6), 2011, pp. 1–10. doi:10.1145/2070781.2024179
11. M. Bati, P. Barla, R. Pacanowski, An inverse method for the exploration of layered material appearance, *ACM Transactions on Graphics*, 40(4), 2021, Article No. 176, pp 1–15. doi:10.1145/3450626.3459857
12. S. Ershov, K. Kolchin, K. Myszkowski, Reverse engineering approach to appearance-based design of metallic and pearlescent paints, *The Visual Computer*, Vol. 20, 2004, pp. 586-600.
13. А.Г. Волобой, С.В. Ершов, С.Г. Поздняков. Интерактивное моделирование автомобильных красок, *Труды 22-й Международной Конференции по Компьютерной Графике и Зрению – Графикон-2012*, 2012, стр. 242-247.
14. В. Леушкин, А. Кузнецов, Применение машинного обучения и математического моделирования в задаче цветоподбора автомобильных эмалей // Приглашенный доклад, *31-я Международная Конференция по Компьютерной Графике и Зрению – Графикон-2021*, 2021.
15. STARTCOLOR. Презентация технологии подбора автоэмалей с помощью искусственного интеллекта. <https://www.youtube.com/watch?v=x8HQMjiCbRI>.
16. J.E. Hansen, Radiative Transfer by Doubling Very Thin Layers, *Astrophys. J.*, 155, 1969, pp. 565-574.
17. J.E. Hansen and L. Travis, Light Scattering in Planetary Atmospheres, *Space Science Reviews*, 16, 1974, pp. 527–610.
18. Метод Мелдера – Нида: [https://en.wikipedia.org/wiki/Nelder-Mead\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Nelder-Mead_method)
19. Индикатриса Хеньи–Гринстейна:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Louis\\_G.\\_Henyey](https://en.wikipedia.org/wiki/Louis_G._Henyey)
20. K. Bartkiewicz, S.V. Ershov, S.G. Pozdnyakov, A.G. Voloboy, Koji Tsuchiya, Nikolay Kirilov, Influence of agglutination on appearance of ink on white paper, *Optics & Photonics Japan 2010, Post-deadline issue*, 2010, pp. 14-15.

## Оглавление

1. Введение.....	3
2. Задача подбора краски по ее внешнему виду .....	4
3. Математическая модель красящего слоя и процедура моделирования .....	5
4. Представление оптических свойств красящего слоя .....	7
5. Определение физических свойств пигментов.....	8
6. Примеры применения существующей модели краски к задаче подбора желаемого цвета .....	10
7. Идея предлагаемого метода, «Метод спуска» .....	11
8. Вариация BRDF. «Метод пробников» .....	13
9. Заключение .....	15
Список литературы.....	15