

УДК 004.021

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.50.3.028](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.50.3.028)

Модель рендер-конвейера как динамический многомерный квадратичный рюкзак с нечеткой нейросетевой моделью оценки предпочтений пользователя

М.М. Фарафонов✉, В.Н. Мымликов, О.А. Антамошкин

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

Резюме. Современная компьютерная графика предлагает множество различных визуальных эффектов для обработки трехмерных сцен в процессе рендеринга. Тяготы вычисления этих графических эффектов ложатся на пользовательское аппаратное обеспечение, что приводит к необходимости идти на компромисс между производительностью и качеством изображения. В связи с этим актуальной становится разработка систем, способных в автоматическом режиме осуществлять оценку качества трехмерного рендера и изображений в целом. Актуальность данной темы выражается в двух направлениях. Во-первых, возможность предсказывать реакцию пользователей позволит производить более точную настройку графических приложений. Во-вторых, понимание предпочтений может помочь в оптимизации трехмерных сцен путем выявления визуальных эффектов, которые могут быть отключены. В более широком смысле это также создает проблему оптимального управления процессом рендера, при котором станет возможным максимально эффективно использовать наличные аппаратные возможности. Потому значимой задачей становится моделирование процесса рендера трехмерной графики в такой форме, при которой будет максимально просто заниматься ее оптимизацией. Целью настоящего исследования является создание такой модели, которая позволит выполнять этап экспертной оценки для автоматического определения качества трехмерного рендера и использовать его для оптимального управления рендер-конвейером. Также обсуждается ряд важных вопросов, которые требуют особого внимания в рамках исследования. Круг применения разрабатываемой системы включает в себя различные сферы человеческой деятельности, в которых задействовано трехмерное моделирование. Подобная система может стать полезным инструментом как для разработчиков, так и для пользователей, что особенно важно в образовании, разработке видеоигр, технологиях виртуальной реальности и др., где требуется моделировать реалистичные объекты или визуализировать сложные процессы.

Ключевые слова: задача о квадратичном рюкзаке, многомерная задача о рюкзаке, искусственные нейронные сети, трехмерный рендеринг, анализ предпочтений пользователей, визуальная оценка качества, технологии будущего.

Для цитирования: Фарафонов М.М., Мымликов В.Н., Антамошкин О.А. Модель рендер-конвейера как динамический многомерный квадратичный рюкзак с нечеткой нейросетевой моделью оценки предпочтений пользователя. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1984> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.028

A rendering pipeline model as a quadratic knapsack problem with multiple knapsack constraints and a fuzzy neural network model for user preference evaluation

M.M. Farafonov✉, V.N. Mymlikov, O.A. Antamoshkin

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, the Russian Federation

Abstract. Modern computer graphics offers many different visual effects for processing three-dimensional scenes during rendering. The burden of calculating these graphic effects falls on the user hardware, which leads to the need to compromise between performance and image quality. In this regard, the development of systems capable of automatically assessing the quality of three-dimensional rendering and images in general becomes relevant. The relevance of this topic is expressed in two directions. First, the ability to predict user reactions will allow for more accurate customization of graphic applications. Second, understanding preferences can help in optimizing 3D scenes by identifying visual effects that can be disabled. In a broader sense, this also poses the challenge of optimally managing the rendering process so that it becomes possible to maximize the use of available hardware capabilities. Therefore, it becomes a significant task to model the process of rendering 3D graphics in such a form, in which it will be as simple as possible to deal with its optimization. The purpose of this study is to create such a model, which will allow to perform the stage of expert evaluation to automatically determine the quality of three-dimensional rendering and use it for optimal control of the rendering pipeline. A number of important issues that require special attention in the research are also discussed. The range of applications of the developed system includes various spheres of human activity involving three-dimensional modeling. Such a system can become a useful tool for both developers and users, which is especially important in education, video game development, virtual reality technologies, etc., where it is necessary to model realistic objects or visualize complex processes.

Keywords: quadratic knapsack problem, multidimensional knapsack problem, artificial neural networks, three-dimensional rendering, user preference analysis, visual quality assessment, future technologies.

For citation: Farafonov M.M., Mymlikov V.N., Antamoshkin O.A. Development of a lightweight model for automatic classification of structured and unstructured data in streaming sources to optimize optical character recognition. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(3). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1984> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.50.3.028

Введение

Современная трехмерная графика стремительно развивается и предлагает множество различных технологий и алгоритмов по улучшению визуального качества рендера. Вместе с тем, тяготы их применения ложатся на аппаратное обеспечение пользователей, чьи вычислительные возможности не безграничны. Это приводит к тому, что необходимо выдерживать баланс между качеством изображения и производительностью приложения. Другими словами, необходимо как можно эффективнее распределить системные ресурсы для получения наиболее приемлемого качества. В связи с этим актуальным становится разработка систем на основе искусственного интеллекта, способных автоматизировать процесс поиска оптимальных настроек приложения под конкретную аппаратную конфигурацию. Интерес к этой теме главным образом связан с двумя направлениями.

Во-первых, подобные системы могут быть полезны для конечных пользователей ввиду возможности персонализации контента [1]. Поскольку в настоящее время взаимодействие с цифровым миром становится неотъемлемой частью жизни для большого числа людей, то способность приложений адаптироваться к предпочтениям пользователя является ключевым аспектом в разработке любых интерфейсов или визуализации данных. Это позволит добиться более естественного взаимодействия между программой и человеком, а также повысить общую степень удовлетворенности пользователя при работе, что особенно важно в сфере образовательных программ, видеоигр, приложений с использованием виртуальной и дополненной реальности и т. д.

Во-вторых, подобные системы также могут быть полезны для разработчиков цифрового контента [2], работающих в области компьютерной трехмерной графики. Современные трехмерные сцены становятся требовательнее к вычислительным ресурсам, что усложняет их обработку в реальном времени и ведет к

неудовлетворительной производительности. Возможность предсказать предпочтения пользователей позволит определить те визуальные эффекты и элементы сцены, которые в данный момент не важны для пользователя и могут быть отключены или же вовсе убраны из приложения на этапе разработки в угоду производительности. Это открывает дополнительные возможности по оптимизации виртуальных миров без ощутимых потерь в качестве и информативности.

Основной целью настоящего исследования является формирование формальной модели рендер-конвейера, которая позволит уменьшить затраты разработчиков трехмерного контента на оптимизацию графики – трудоемкого, но важного процесса. Для достижения этой цели в качестве задач определено изучение существующих моделей рендер-конвейера, описание ключевых элементов новой модели формальным языком, а также определение перспектив дальнейшего применения разработанной модели.

Обзор классической модели рендер-конвейера

Вначале необходимо сказать несколько слов об устройстве компьютерной графики для лучшего понимания окружения, в котором будет функционировать система.

Трехмерный рендеринг – это процесс преобразования 3D-моделей, сцен и других данных в изображения или анимацию. Полученный результат называется рендером. Процесс рендеринга включает в себя несколько этапов, организованных по принципу конвейера для достижения максимальной производительности. Существует множество различных программных реализаций рендер-конвейера (DirectX [3], OpenGL¹, Vulkan [4] и др.), опирающихся на общую логическую модель, представленную на Рисунке 1.

В классическом варианте логическая модель рендер-конвейера состоит из 4 элементов [5]: приложение, обработка геометрии, растеризация и обработка пикселей. На уровне приложения просчитывается физическое состояние мира и объектов сцены. При обработке геометрии осуществляется ряд процедур, направленных на работу с вершинами трехмерных объектов, определения перспективы и отсечение полезного объема сцены. На этапе растеризации происходит отображение виртуальных объектов на сетку пикселей. На завершающем этапе происходит дополнительная обработка пикселей и сведение полученных результатов воедино, после чего итоговое изображение показывается на мониторе пользователя или ином устройстве вывода.

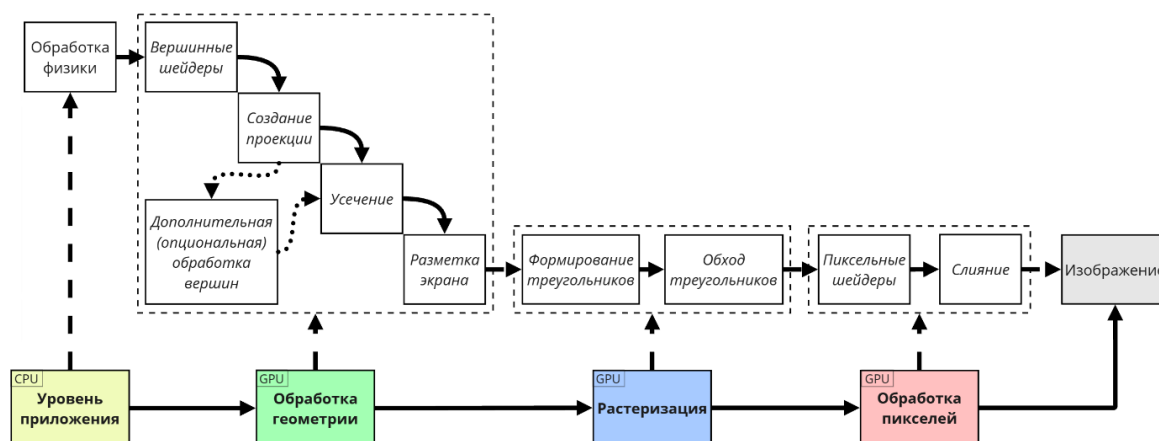


Рисунок 1 – Классическая модель рендер-конвейера

Figure 1 – Classic model of the rendering pipeline

¹ Гинсбург Д., Пурномо Б. *OpenGL ES 3.0. Руководство разработчика*. Москва: ДМК-Пресс; 2015. 448 с.

Хотя такая модель отлично позволяет понять этапы и структуру процесса рендера, тем не менее она слабо применима для производства каких-либо оптимизационных мероприятий. Связано это в первую очередь с отсутствием числовых характеристик, влияя на которые можно было бы получить те или иные улучшения. Таким образом, становится очевидной необходимость формирования новой математической модели данного процесса.

Формализация задачи

На финальных этапах работы графического конвейера рендер подвергается дополнительной обработке с целью добавления различных визуальных эффектов. Этим занимаются специальные подпрограммы, которые называются шейдерами². Каждый шейдер реализует определенный эффект, влияя на реалистичность/красоту изображения на экране и удовлетворенность пользователя от увиденного. При этом интуитивно понятно, что разные шейдеры будут иметь различный вклад в итоговую реалистичность: одни шейдеры будут в большей степени оказывать влияние на качество рендера, другие – в меньшей.

Проблема в том, что в действительности вклад шейдеров неизвестен и может быть зависим от контекста. Например, вклад шейдеров может варьироваться при разных состояниях трехмерной сцены, комбинация некоторых шейдеров может давать эффект, не сводимый к простому суммированию их по отдельности и т. п. Получение актуального, соответствующего происходящему на экране распределения реалистичности между шейдерами становится непростой задачей.

С другой стороны, эксперты-люди, глядя на рендер, довольно просто могут дать свои оценки реалистичности, оперируя нечеткими понятиями [6] («некрасиво», «скорее красиво», «очень красиво» и т. д.), которые можно представить в виде значений на числовой шкале, например, от –100 до 100, от –1 до 1, от 0 до 1 и т. п. Эти данные можно использовать для обучения модели, которая будет воспроизводить поведение функции реалистичности, опираясь на экспертное мнение.

Как уже упоминалось в более ранней работе [7], при моделировании процесса рендера также важно учитывать объективные ограничения, налагаемые аппаратными возможностями на комбинации шейдеров, которые могут быть запущены одновременно. Для большей точности и соответствия реальному положению дел нужно учитывать ряд ограничений, выраженных значениями доступных аппаратных ресурсов, таких как процессорное время, оперативная память, видеопамять и др. Если говорить о прикладной стороне вопроса, то очевидно возникает необходимость поиска такой комбинации шейдеров, которая даст наибольшую возможную привлекательность. Потому весь процесс рендера трехмерной графики, в котором присутствует возможность настраивать используемые шейдеры, может быть с достаточно высокой степенью точности смоделирован в виде динамической многомерной квадратичной задачи о рюкзаке. Более формально это можно представить следующим образом:

1. Имеется набор шейдеров $S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$, где $s_i \in \{0, 1\}$, $i = \overline{1, n}$.
2. Имеется набор ограничений $C = (c_1, c_2, \dots, c_m)$, $c_j \in R$, $j = \overline{1, m}$, в роли ограничений выступают вычислительные ресурсы центрального процессора, объем оперативной памяти, объем графической памяти видеокарты и т. п.

² Alda Á. Introduction to Shaders. In: *Beginner's Guide to Unity Shader Graph: Create Immersive Game Worlds Using Unity's Shader Tool*. Berkeley: Apress; 2023. P. 1–21.

3. Шейдеры связаны через матрицу ценности $V = \begin{pmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & \cdots & v_{nn} \end{pmatrix}$, где $v_{ij} \in R$, $i, j = \overline{1, n}$.

4. При этом i -й шейдер потребляет часть доступных ресурсов, что выражается в виде i -й строки матрицы весов $W = \begin{pmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & \cdots & w_{nm} \end{pmatrix}$, где $w_{ij} \in R$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$.

5. Общая красота рендера $A_r = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n v_{ik} s_i s_k$, где $A_r \in R$.

5.1. Экспертная оценка рендера $A_{expert} = \frac{1}{H} \sum_{k=1}^H A_k$, где H – число экспертов-людей, A_k – оценка красоты от k -го эксперта.

5.2. Считая, что $A_r = A_{expert}$, будем искать матрицу V при помощи искусственной нейронной сети вида $Net(\omega, I)$ с обучаемыми параметрами ω и изображением рендера I в качестве входного сигнала.

5.3. Полагая, что предсказание сети $A^* = A_{expert}$, строим функцию ошибки $L = Loss(A^*, A_{expert})$.

5.4. Необходимо найти такой набор параметров ω^* , при котором ошибка L будет минимальна. Таким образом, планируется изучить поведение матрицы V при помощи нейросетевой модели $Net(\omega, I)$, опираясь только на наблюдаемое изображение рендера I и экспертные оценки A_{expert} , которые неявно содержат в себе данные о взаимосвязи шейдеров S .

6. Необходимо максимизировать A_r , не превысив ограничение на ресурсы, которое можно выразить в виде неравенства $\sum_{i=1}^n w_{ij} s_i \leq c_j$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, в противном случае решение считается некорректным и отбрасывается.

6.1. Пусть существует корректная и наилучшая с точки зрения качества A_r комбинация шейдеров S^* .

6.2. Задача оптимизации рендер-конвейера заключается в поиске такой корректной комбинации шейдеров S_{est} , ценность которой будет максимально близка к ценности S^* .

6.3. Поиск S_{est} будет осуществляться на основе алгоритмических решений при помощи метрик качества, общий вид которых можно представить, как $Z = Metric(S^*, S_{est})$.

6.4. Необходимо найти такой набор S_{est} , при котором величина Z будет максимальна.

Обсуждение

Как было заявлено выше, задача оптимизации рендер-конвейера сводится к решению поставленной динамической многомерной квадратичной бинарной задачи о рюкзаке. Данная разновидность задачи о рюкзаке практически не исследована с точки зрения применения разных алгоритмов [8], однако все же есть работа, которая позволяет считать, что достаточно быстрый и точный алгоритм может быть найден [9]. В данной работе для малых размерностей (10–100 предметов и размерность весов от 3 до 6) при использовании точного алгоритма Branch and Cut было множество примеров быстрого нахождения решения. Для решения задачи о рюкзаке в указанной постановке будут опробованы различные алгоритмические решения [8, 10], в частности, нейронные сети. В данном случае важнейшими параметрами являются точность найденного решения и скорость работы. Так как в случае с NP-трудной задачей, коей является задача о рюкзаке и все ее разновидности, эти параметры очевидно конфликтуют друг с другом, то для

достижения практически применимого результата необходимо будет найти компромисс. Ввиду того факта, что сфера оптимизации трехмерной графики связана с имитацией и автоматизацией человеческого выбора, а именно поиска того, что человек выбрал бы сам, занимаясь он настройкой графики на каждом кадре, то одним из наиболее последовательных путей будет применение нейронных сетей. Связано это с тем, что данный вид алгоритмов может достаточно точно имитировать поведение человека. Существует множество видов нейронных сетей, среди которых присутствуют полносвязные, сверточные, рекуррентные, и прочие архитектуры, в частности, относительно новая архитектура сетей трансформеров [11]. Для задачи о рюкзаке, в частности, и семейства комбинаторных задач, в целом, есть примеры применения рекуррентных сетей [12]. Другие архитектуры используются реже [13, 14], да и указанные применялись к классической постановке – одномерной и линейной.

Если говорить о модели оценки привлекательности рендера, то в качестве нее планируется использовать искусственную нейронную сеть на основе высокопроизводительной архитектуры Swin-Transformer [15], которая демонстрирует перспективные результаты в области визуальной оценки качества, о чем свидетельствуют работы [16, 17]. Кроме этого, возможны и другие варианты сети, например, комбинация сверточных сетей с трансформерами [18] или графовыми сетями [19] и т. д.

На вход модели будут подаваться трехканальные изображения обработанного рендера. Выходным значением будет число, интерпретируемое как оценка качества и получаемое при помощи полносвязных слоев. Процесс обучения будет организован по принципу обучения с учителем, в роли истинных значений будут выступать усредненные оценки экспертов для входного изображения. Помимо самой оценки также необходимо получить матрицу ценности шейдеров, т. е. необходимо представить числовую оценку в виде составляющих ее элементов. Так как напрямую получить от экспертов матрицу взаимного влияния шейдеров друг на друга – практически неосуществимая задача ввиду временных рамок, то гипотеза строится вокруг ее неявного извлечения из числовых оценок, полученных для целого набора шейдеров. Теоретически матрицу нужного размера можно получить, если перехватить результат матричного умножения между полносвязными слоями или внутри блока само-внимания трансформера. Для направления хода изучения матрицы можно воспользоваться бинарным вектором активных шейдеров, построив из него маску. Экспериментальная проверка данной идеи, как и сравнение эффективности различных вариаций архитектур, будет описана и представлена в будущих работах.

Процесс сбора и интерпретации экспертных оценок будет организован по методу SSCQE (Single Stimulus Continuous Quality Evaluation) [20]. Экспертам будет демонстрироваться отрендеренный видеоряд, содержащий в себе множество различных сцен (лес, город, комната и др.) с различными комбинациями шейдеров по аналогии с тем, как это делалось в работе [21]. Пользователь будет оценивать видеоряд при помощи ползункового механизма, отображаемого в виде интерфейса на экране. Отдельно для каждого кадра видеоряда будет сниматься загруженность аппаратных ресурсов при включении разных шейдеров, что позволит зафиксировать вычислительный вес используемых шейдеров. Полученный таким образом набор данных будет включать в себя номер кадра, информацию об активных шейдерах, оценку эксперта и загруженность ресурсов.

Таким образом, сочетание нейронной сети и набора экспертных данных было выбрано как лучшее решение для построения экспертной модели оценки качества. В данном случае закономерно возникает вопрос доказательности неявного получения информации о ценности шейдеров. Эта проблема будет решена путем проверки

эффективности работы системы оптимизации рендер-конвейера. Если в результате ее работы удастся добиться статистически значимого увеличения экспертных оценок в положительную сторону для примеров рендера в сравнении с иными комбинациями шейдеров, не являющимися оптимальными, то гипотеза об изучении матрицы взаимосвязей через нейронную сеть будет верна.

Также необходимо отметить, что процесс поиска решения рюкзака, как и предсказание оценки качества, сами по себе уже задействуют некоторую часть доступных аппаратных ресурсов при выполнении. Это становится особенно критичным при работе в режиме реального времени, поэтому при реализации необходимо сделать систему максимально легковесной для минимизации нагрузки на пользовательское обеспечение. Тем не менее, в случае, если не удастся обеспечить работу в реальном времени, описываемые алгоритмы все еще могут производить статическую оптимизацию шейдеров на этапе разработки трехмерных сцен с целью подбора наиболее удачной комбинации визуальных эффектов для различных регионов сцены.

Описание системы

Основные возможности применения представленной модели процесса рендера сводятся к поиску различных оптимизационных стратегий, которые будут применяться в реальном программном обеспечении, в частности, в компьютерных играх, рекламе, создании видео и прочих сферах, в которых задействуют виртуальную трехмерную графику. Для реализации указанных идей необходимо разработка универсального программного решения, которое можно будет достаточно легко и быстро встраивать в другие системы по необходимости.

Ядро указанной системы будет содержать в себе подсистему для поиска решения задачи о рюкзаке, что необходимо для подбора наилучшего в каждый момент времени набора графических шейдеров. Также будет реализована подсистема, отвечающая за выполнение оценки качества, которая в свою очередь будет отражать привлекательность рендера с точки зрения пользователя. Модуль оценки качества будет как работать в рамках самой системы, так и предусматривать возможность отдельного использования в том случае, когда оптимизация ресурсов не требуется, а необходимо оценить только лишь визуальное качество.

Взаимодействие между подсистемами будет заключаться в передаче матрицы ценности шейдеров от модуля оценки качества к модулю оптимизации, который, располагая сведениями о загруженности системных ресурсов, будет формировать новый набор шейдеров. Схема предложенного решения представлена на Рисунке 2.

В работе [7] рассматривалась возможность создания внешней по отношению к графическому конвейеру системы оптимизации, которая в процессе своей работы управляла бы выбором графических шейдеров для обеспечения максимальной возможной привлекательности рендера. Представленная в той работе идея системы предполагает, что оптимизатор принимает результирующее изображение, оценивает его, на основе оценки рендера формирует оценки значимости шейдеров и применяет их для решения задачи о многомерном рюкзаке, выбирая таким образом наилучшую комбинацию графических эффектов. Настоящая работа расширяет идеи, предложенные в статье [7], добавляя в модель рендер-конвейера учет взаимного влияния шейдеров друг на друга, что и приводит к квадратичному рюкзаку.

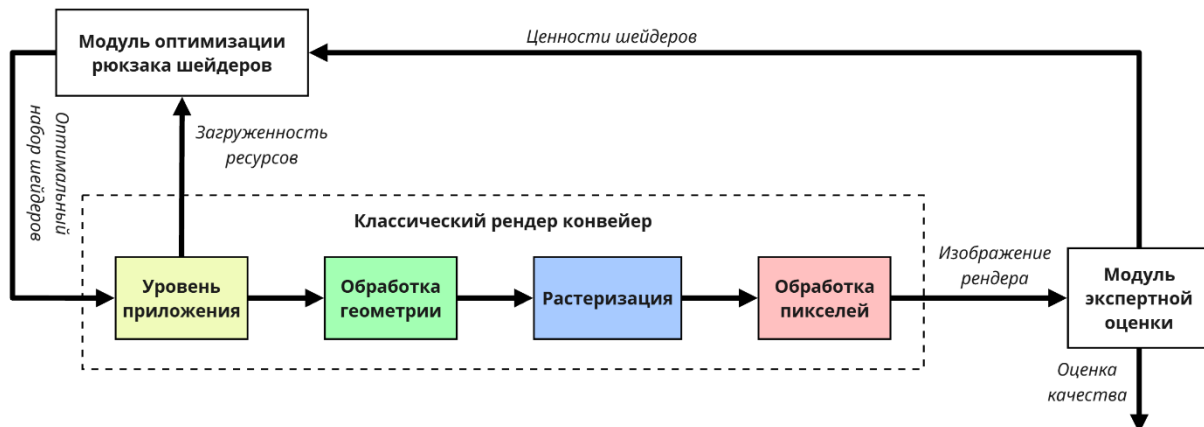


Рисунок 2 – Схема организации предложенной системы
Figure 2 – Scheme of organization of the proposed system

Заключение

Компьютерная трехмерная графика является неотъемлемой частью современного мира и на ее отображение ежедневно уходит огромное количество электроэнергии, времени и прочих ресурсов, потому крайне важно, чтобы ее формирование и обработка происходили настолько эффективно, насколько возможно. Система оптимизации рендер-конвейера, сводящая проблему оптимизации трехмерной графики до задачи о рюкзаке, будет востребована во множестве самых разных сфер. Среди них можно выделить сферу развлечений, в частности, компьютерные игры, сферу кинематографа, где предложенное решение позволит уменьшить затраты на создание сложных графических сцен, также определенный интерес может присутствовать в сфере рекламы и веб-графики, где нужно представить привлекательный внешний вид без перегрузки аппаратуры пользователя.

Основные результаты текущей работы можно сформулировать в виде нескольких пунктов.

1. Была изучена классическая модель рендер-конвейера, которая хотя и позволяет эффективно изучить процесс отображения рендера на экран, но не предусматривает в себе каких-либо инструментов, относящихся к процессу оптимизации.

2. Была представлена формальная модель организации рендер-конвейера, рассматривающая процесс рендеринга с точки зрения многомерной квадратичной задачи о рюкзаке, которая позволяет с высокой достоверностью представить работу конвейера, сводя его к оптимизационной проблеме.

3. Была описана схема возможной реализации предложенной модели, состоящая из двух главных модулей, расширяющих классическую модель рендер-конвейера для управления графическими шейдерами.

Предложенная система имеет высокий потенциал применения в реальных программных продуктах, в качестве которых могут выступать различные трехмерные движки. В частности, она может быть реализована в виде пакета для игрового движка Unity и поставляться в виде набора ассетов, доступных для импорта в проект.

В последующих работах будет проведена экспериментальная часть исследования, в ходе которой будет выполнена оценка эффективности предложенной модели. По итогам проверки, в случае если система обеспечит статистически значимое улучшение оценок в сравнении с результатами, полученными от экспертов ранее, можно будет утверждать, что предложенная модель соответствует действительности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Costa C.J., Aparicio J.T., Aparicio M., Aparicio S. Gamification and AI: Enhancing User Engagement through Intelligent Systems. arXiv. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.10462> [Accessed 13th May 2025].
2. Koulaxidis G., Xinogalos S. Improving Mobile Game Performance with Basic Optimization Techniques in Unity. *Modelling*. 2022;3(2):201–223. <https://doi.org/10.3390/modelling3020014>
3. Luna F.D. *Introduction to 3D Game Programming with DirectX 12*. Dulles: Mercury Learning and Information; 2016. 900 p.
4. Castorina M., Sassone G. *Mastering Graphics Programming with Vulkan: Develop a Modern Rendering Engine from First Principles to State-Of-the-Art Techniques*. Birmingham: Packt Publishing Ltd.; 2023. 382 p.
5. Akenine-Möller T., Haines E., Hoffman N. *Real-Time Rendering*. Boca Raton: CRC Press; 2019. 1045 p.
6. Antamoshkin O.A., Bryukhanova E.R., Antamoshkina V.O., Pikov N.O., Kukartsev V.V., Tynchenko V.V. Implementation of the Wölfflin Formal Statistical Analysis Method Using Fuzzy Logic. In: *Journal of Physics: Conference Series: International Scientific Conference "Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH-2019": Volume 1399: Issue 3, 25–27 September 2019, Krasnoyarsk, Russia*. Institute of Physics and IOP Publishing Limited; 2019. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/3/033103>
7. Мымликов В.Н., Антамошкин О.А., Фарафонов М.М. Формализация задачи оптимизации рендера компьютерной трехмерной графики как вариант многомерной задачи о рюкзаке. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(3). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.46.3.014>
Mymlikov V.N., Antamoshkin O.A., Farafonov M.M. Formalization of the Computer Three-Dimensional Graphics Rendering Optimization Problem as a Variant of the Multidimensional Knapsack Problem. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(3). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.46.3.014>
8. Cacchiani V., Iori M., Locatelli A., Martello S. Knapsack Problems – An Overview of Recent Advances. Part II: Multiple, Multidimensional, and Quadratic Knapsack Problems. *Computers & Operations Research*. 2022;143. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105693>
9. Wang H., Kochenberger G., Glover F. A Computational Study on the Quadratic Knapsack Problem with Multiple Constraints. *Computers & Operations Research*. 2012;39(1):3–11. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.12.017>
10. Cacchiani V., Iori M., Locatelli A., Martello S. Knapsack Problems – An Overview of Recent Advances. Part I: Single Knapsack Problems. *Computers & Operations Research*. 2022;143. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105692>
11. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., et al. Attention Is All You Need. In: *Advances in Neural Information Processing Systems 30: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2017, 04–09 December 2017, Long Beach, CA, USA*. 2017. P. 5998–6008. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>
12. Nomer H.A.A., Alnowibet Kh.A., Elsayed A., Mohamed A.W. Neural Knapsack: A Neural Network Based Solver for the Knapsack Problem. *IEEE Access*. 2020;8:224200–224210. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3044005>
13. Zhou Yi., Kuang Zh., Wang J. A Chaotic Neural Network Combined Heuristic Strategy for Multidimensional Knapsack Problem. In: *Advances in Computation and Intelligence: Third International Symposium on Intelligence Computation and Applications, ISICA*

- 2008: *Proceedings, 19–21 December 2008, Wuhan, China*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2008. P. 715–722. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92137-0_78
14. Afshar R.R., Zhang Yi., Firat M., Kaymak U. A State Aggregation Approach for Solving Knapsack Problem with Deep Reinforcement Learning. In: *Proceedings of the 12th Asian Conference on Machine Learning, ACML 2020: Volume 129, 18–20 November 2020, Bangkok, Thailand*. PMLR; 2020. P. 81–96. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.12117>
 15. Liu Z., Lin Yu., Cao Yu., et al. Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer Using Shifted Windows. In: *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 10–17 October 2021, Montreal, QC, Canada*. IEEE; 2021. P. 9992–10002. <https://doi.org/10.1109/ICCV48922.2021.00986>
 16. Kim H., Yim Ch. Swin Transformer Fusion Network for Image Quality Assessment. *IEEE Access*. 2024;12:57741–57754. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3378092>
 17. Hu Zh., Yang G., Du Zh., Huang X., Zhang P., Liu D. No-Reference Image Quality Assessment Based on Global Awareness. *PLoS ONE*. 2024;19(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0310206>
 18. Golestaneh S.A., Dadsetan S., Kitani K.M. No-Reference Image Quality Assessment via Transformers, Relative Ranking, and Self-Consistency. In: *2022 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), 03–08 January 2022, Waikoloa, HI, USA*. IEEE; 2022. P. 3989–3999. <https://doi.org/10.1109/WACV51458.2022.00404>
 19. He T., Shi L., Xu W., Wang Yu, Qiu W., Guo H. From Pixels to Rich-Nodes: A Cognition-Inspired Framework for Blind Image Quality Assessment. *IEEE Transactions on Broadcasting*. 2025;71(1):229–239. <https://doi.org/10.1109/TBC.2024.3464418>
 20. Грачева М.А., Божкова В.П., Казакова А.А., Рожкова Г.И. Субъективная оценка качества статических и видеоизображений: методологический обзор. *Сенсорные системы*. 2019;33(4):287–304. <https://doi.org/10.1134/S0235009219040036>
Gracheva M.A., Bozhkova V.P., Kazakova A.A., Rozhkova G.I. Subjective Image and Video Quality Assessment: Methodology Review. *Sensory Systems*. 2019;33(4):287–304. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0235009219040036>
 21. Peresunko P., Mamatin D., Antamoshkin O., Peresunko E., Nikitin A. Models of Experts for Shaders Estimation of Rendering Complex 3D Scenes in Real Time. In: *2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 10–12 November 2021, Lipetsk, Russia*. IEEE; 2021. P. 895–897. <https://doi.org/10.1109/SUMMA53307.2021.9632071>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фарафонов Максим Михайлович, аспирант, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация.
e-mail: mfarafonov@sfu-kras.ru
ORCID: [0000-0002-2218-538X](https://orcid.org/0000-0002-2218-538X)

Maxim M. Farafonov, Postgraduate, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

Мымликов Владислав Николаевич, аспирант, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация.
e-mail: vmymlikov-ki21@stud.sfu-kras.ru
ORCID: [0000-0001-7631-4901](https://orcid.org/0000-0001-7631-4901)

Vladislav N. Mymlikov, Postgraduate, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

Антамошкин Олеслав Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры программной инженерии, Сибирский

Oleslav A. Antamoshkin, Doctor of Engineering Sciences, Docent, Professor of the Chair of

федеральный университет, Красноярск, Software Engineering, Siberian Federal
Российская Федерация. University, Krasnoyarsk, the Russian Federation.

e-mail: oantamoskin@sfu-kras.ru

ORCID: [0000-0002-5976-5847](https://orcid.org/0000-0002-5976-5847)

*Статья поступила в редакцию 02.06.2025; одобрена после рецензирования 14.07.2025;
принята к публикации 30.07.2025.*

*The article was submitted 02.06.2025; approved after reviewing 14.07.2025;
accepted for publication 30.07.2025.*