

Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал
№ 10 (125)/2024 Том 1

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Макаровский Денис Анатольевич

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

• **Штерензон Вера Анатольевна**

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

• **Синьковский Антон Владимирович**

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

• **Штерензон Владимир Александрович**

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

• **Зыков Сергей Арленович**

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

• **Дронсейко Виталий Витальевич**

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А
E-mail: info@euroasia-science.ru ;
www.euroasia-science.ru

Учредитель и издатель ООО «Логика+»
Тираж 1000 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

Перфильев М.С.

ОЦЕНКА СРЕДНИХ ИНТЕРВАЛОВ МЕЖДУ
ПРОСТЫМИ ЧИСЛАМИ3

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

Piastou M.

A REVIEW OF BENCHMARKS FOR EVALUATING THE
MATHEMATICAL ABILITIES OF MODERN LLM IN
ADVANCED PROBLEM SOLVING9

Михайлюк С.Д.

РАЗРАБОТКА WEBGL РЕНДЕРЕРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ LOTTIE АНИМАЦИИ.....16

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Болгова Е.А., Толкунова Ю.Н.

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАДИАЛЬНОГО
ПОДШИПНИКА25

Рамазанов И.М.

ИНТЕГРАЦИЯ НАТИВНЫХ МОДУЛЕЙ В ПРОЕКТЫ НА
REACT NATIVE34

Назина А.В., Кункова Е.А.

СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ
ОТЕЧЕСТВЕННЫМИ СТРОИТЕЛЬНЫМИ
ОРГАНИЗАЦИЯМИ30

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

УДК 511.313

ОЦЕНКА СРЕДНИХ ИНТЕРВАЛОВ МЕЖДУ ПРОСТЫМИ ЧИСЛАМИ*Перфильев Михаил Сергеевич,**PhD в области математики,**Доктор Международной Академии Естествознания,**РФ, г. Иркутск***PRIME GAPS ESTIMATION***Perfileev Michael Sergeevich,**PhD in mathematics,**Doctor of International Academy of Natural History**Russia, Irkutsk***DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2024.1.125.2132****АННОТАЦИЯ**

Данная работа относится к области теории чисел и посвящена исследованию интервалов между простыми числами и теоремы о распределении простых чисел. При помощи третьей теоремы Мертенса получено новое выражение средних интервалов между простыми числами $g_n = p_{n+1} - \frac{p_{n+1}}{p_{n+1}\sqrt{p_{n+1}}}$. Показано, что это значение также имеет порядок $\ln(p)$, как это следует из теоремы о распределении простых чисел. Также в работе приведена альтернативная формулировка $\pi(n) \sim \frac{n}{n - \sqrt[n]{n}}$ общеизвестной теоремы о распределении простых чисел. Получены формулы для оценки количества простых чисел на отрезке $[1; n]$, эквивалентные интегральному логарифму.

ABSTRACT

This work relates to the number theory branch and is devoted to the study of prime gaps and prime number theorem. Using Mertens' third theorem, a new expression for average prime gaps has been obtained $g_n = p_{n+1} - \frac{p_{n+1}}{p_{n+1}\sqrt{p_{n+1}}}$. This work shows that this value is also of order $\ln(p)$, as it follows from the prime number theorem. The work also provides an alternative formulation $\pi(n) \sim \frac{n}{n - \sqrt[n]{n}}$ of the well-known prime number theorem. Formulas for estimating the number of prime numbers on the interval $[1; n]$ have been obtained, they are equivalent to the logarithmic integral function.

Ключевые слова: интервалы между простыми числами, теорема о распределении простых чисел, третья теорема Мертенса, бесконечное произведение, постоянная Эйлера-Маскерони, интегральный логарифм

Keywords: prime gaps, prime number theorem, Mertens' third theorem, infinite product, Euler-Mascheroni constant, logarithmic integral function

Введение

Интервалами между простыми числами называют разности между двумя последовательными простыми числами, т. е. n -ый интервал равен $g_n = p_{n+1} - p_n$, где p_n - n -ое по счету простое число. Последовательность интервалов между простыми числами [1]:

1, 2, 2, 4, 2, 4, 2, 4, 6, 2, 6, 4, 2, 4, 6, 6, 2, 6, 4, 2 ...

Согласно теореме о распределении простых чисел $\pi(n) \sim \frac{n}{\ln(n)}$ при $n \rightarrow \infty$ (эквивалентно $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\pi(n)}{n/\ln(n)} = 1$), т. е. количество простых чисел на отрезке $[1; n]$ с увеличением n примерно растет как $\frac{n}{\ln(n)}$ [2]. Отсюда следует, что среднее значение интервалов между простыми числами имеет порядок $\ln(p)$ (речь идет именно о средней длине, фактическая длина может быть больше или меньше). То есть существуют сколь угодно большие интервалы между простыми числами. Значимый результат в теории чисел получил Чебышев в 1850 году, доказав, что для достаточно больших значений x справедливо двойное неравенство [3]

$$0,921 \frac{x}{\ln(x)} < \pi(x) < 1,106 \frac{x}{\ln(x)}.$$

Изучению интервалов между простыми числами посвящено множество научных трудов, существуют недоказанные гипотезы об интервалах между простыми числами (гипотеза Крамера, гипотеза Андрицы, гипотеза Лежандра, гипотеза Фирузбэخت).

Целями данной работы являются вывод нового выражения для средних интервалов между простыми числами и получение новой формулировки теоремы о распределении простых чисел (и ее следствий). В качестве методологической базы в работе использованы третья теорема Мертенса, аппарат математического анализа и пакеты прикладных компьютерных программ для численных расчетов и построения графиков функций.

Средние интервалы между простыми числами

Воспользуемся третьей теоремой Мертенса [4] :

$$\prod_{p \leq n} \left(1 - \frac{1}{p}\right) \sim \frac{e^{-\gamma}}{\ln(n)}, \quad (1)$$

где произведение берется по всем простым числам p , не превосходящим n ;

$\gamma = 0,5772156649\dots$ - постоянная Эйлера-Маскерони [5].

Robin доказал, что для этой теоремы разность $\ln(n) \prod_{p \leq n} \left(1 - \frac{1}{p}\right) - e^{-\gamma}$ меняет знак бесконечно много раз [6].

Также формулу (1) можно записать в виде [7]

$$e^{\gamma} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{\ln(p_n)} \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{p_i}} \right) \right), \quad (2)$$

где p_i - это i -ое по счету простое число.

Пользуясь формулой (2), запишем выражения

$$e^{\gamma} \sim \frac{1}{\ln(p_n)} \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{p_i}} \right); \quad e^{\gamma} \sim \frac{1}{\ln(p_{n+1})} \prod_{i=1}^{n+1} \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{p_i}} \right) \text{ при } n \rightarrow \infty,$$

откуда следует

$$\frac{1}{\ln(p_n)} \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{p_i}} \right) \sim \frac{1}{\ln(p_{n+1})} \prod_{i=1}^{n+1} \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{p_i}} \right). \quad (3)$$

Выражение (3) можно записать в форме

$$\frac{1}{\ln(p_n)} \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{p_i}} \right) \sim \frac{1}{\ln(p_{n+1})} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{p_{n+1}}} \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{p_i}} \right), \quad (4)$$

откуда

$$\frac{1}{\ln(p_n)} \sim \frac{1}{\ln(p_{n+1})} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{p_{n+1}}}; \quad \ln(p_n) \sim \ln(p_{n+1}) \cdot \left(1 - \frac{1}{p_{n+1}}\right); \quad \frac{\ln(p_n)}{\ln(p_{n+1})} \sim 1 - \frac{1}{p_{n+1}} \text{ при } n \rightarrow \infty.$$

Тогда по формуле перехода к новому основанию для логарифмов $\log p_{n+1}(p_n) \sim 1 - \frac{1}{p_{n+1}}$, а по определению логарифма

$$p_n \sim p_{n+1}^{\frac{1 - \frac{1}{p_{n+1}}}{p_{n+1}}}. \quad (5)$$

Используя основное логарифмическое тождество, запишем (5) в виде

$$p_n \sim e^{\left(1 - \frac{1}{p_{n+1}}\right) \ln(p_{n+1})}. \quad (6)$$

При помощи разложения экспоненты в ряд Маклорена $e^x = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{x^m}{m!}$ [8] выражение (6) также можно записать в форме

$$p_n \sim 1 + \left(1 - \frac{1}{p_{n+1}}\right) \ln(p_{n+1}) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{p_{n+1}}\right)^2 (\ln(p_{n+1}))^2 + \frac{1}{6} \left(1 - \frac{1}{p_{n+1}}\right)^3 (\ln(p_{n+1}))^3 + \dots \quad (7)$$

Также выражение (5) можно записать в равносильной форме

$$p_n \sim \frac{p_{n+1}}{p_{n+1}^{\frac{1}{p_{n+1}}}}, \quad (8)$$

тогда промежутки между простыми числами

$$g_n = p_{n+1} - \frac{p_{n+1}}{p_{n+1} \sqrt{p_{n+1}}} \cdot (9)$$

Заметим, что согласно формуле (8) среднее значение интервалов между простыми числами также имеет порядок $\ln(p)$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{p_{n+1} - \frac{p_{n+1}}{p_{n+1} \sqrt{p_{n+1}}}}{\ln(p_{n+1})} = 1 \cdot (10)$$

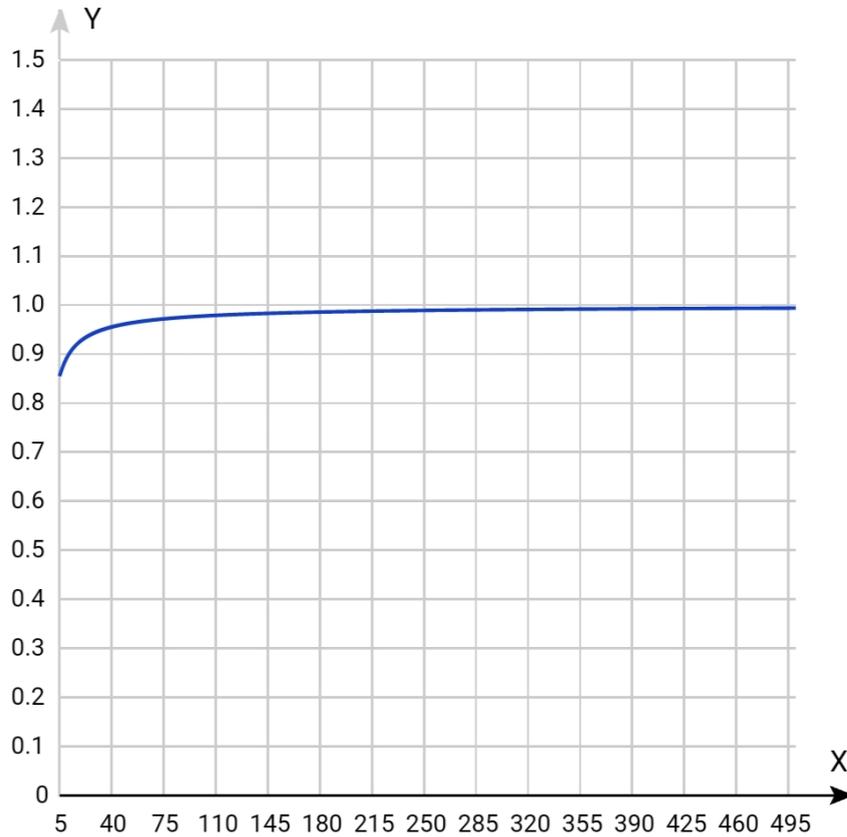
Продемонстрируем истинность предела (10) при помощи графика функций (рис. 1).

Поэтому можно дать альтернативную формулировку теоремы о распределении простых чисел:

$$\pi(n) \sim \frac{n}{n - \frac{n}{\sqrt{n}}} \text{ при } n \rightarrow \infty \cdot (11)$$

Значит вероятность того, что наугад выбранное натуральное число из отрезка $[1;n]$ окажется простым, приблизительно равна

$$probability \approx \frac{1}{n - \frac{n}{\sqrt{n}}} \cdot (12)$$



$$y(x) = \frac{x - x^{1 - \frac{1}{x}}}{\ln(x)}$$

Рис. 1. График функции $y = \frac{x - \frac{x}{\sqrt{x}}}{\ln(x)}$ асимптотически приближается к 1 с ростом x .

Предположим, что количество простых чисел на отрезке $[1;n]$ можно оценить при помощи выражения

$$\pi(n) \sim \int_2^n \frac{dx}{x - \frac{x}{\sqrt{x}}}. \quad (13)$$

Запишем выражение $\frac{1}{x - \frac{x}{\sqrt{x}}}$ как $\frac{1}{x - \frac{x}{\sqrt{x}}} = \frac{1}{x^{1+1/x-x}} + \frac{1}{x}$, тогда с использованием свойств определенного интеграла и формулы Ньютона-Лейбница [9] формула (13) запишется в виде

$$\pi(n) \sim \int_2^n \left(\frac{1}{x^{1+1/x-x}} + \frac{1}{x} \right) dx = \int_2^n \frac{dx}{x^{1+1/x-x}} + \ln(n) - \ln(2). \quad (14)$$

Оставив только первое слагаемое в правой части формулы (14), запишем

$$\pi(n) \sim \int_2^n \frac{dx}{x^{1+1/x-x}}. \quad (15)$$

Как известно, достаточно точно распределение простых чисел можно описать при помощи интегрального лорарифма $Li(x) = \int_2^x \frac{dt}{\ln(t)}$. Если гипотеза Римана [10] верна, то справедливо утверждение

$$|Li(x) - \pi(x)| \leq c\sqrt{x}\ln(x), \text{ где } c - \text{некоторая константа (Wagon, 1991 [11])}.$$

Запишем количество простых чисел на рассматриваемых отрезках $[1;n]$ в формате {истинное количество простых чисел; количество простых, найденное при помощи формулы $\frac{n}{\ln(n)}$; количество простых, найденное по формуле $\frac{n}{n - \frac{n}{\sqrt{n}}}$; количество простых чисел, найденное по формуле $\int_2^n \frac{dx}{\ln(x)}$; количество простых чисел, найденное по формуле $\int_2^n \frac{dx}{x - \frac{x}{\sqrt{x}}}$; количество простых, найденное при помощи формулы $\int_2^n \frac{dx}{x^{1+1/x-x}}$ }:

[1;10]: {4; 4; 5; 5; 6; 4}

[1;100]: {25; 22; 22; 29; 31; 27}

[1;1000]: {168; 145; 145; 177; 180; 174}

[1;10000]: {1229; 1086; 1086; 1245; 1249; 1241}

[1;100000]: {9592; 8686; 8686; 9629; 9634; 9623}

[1;1000000]: {78498; 72382; 72383; 78627; 78633; 78620}

[1;10000000]: {664579; 620421; 620421; 664917; 664925; 664910}

[1;100000000]: {5761455; 5428681; 5428682; 5762208; 5762217; 5762200}

[1;10⁹]: {50847534; 48254942; 48254943; 50849234; 50849244; 50849224}

Заметим, что полученные при помощи формулы (13) результаты являются достаточно точными. Результаты, полученные с помощью формулы (15), являются еще более точными (в том числе они более точны, чем результаты, полученные при помощи сдвинутого интегрального логарифма).

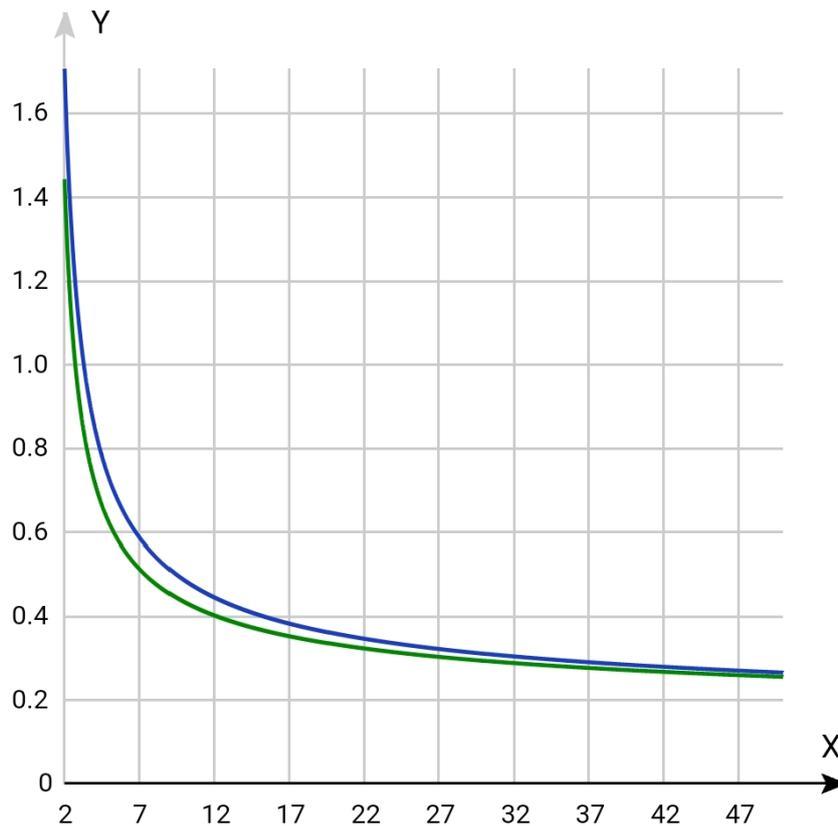
Заметим, что подынтегральная функция в формуле (13) $f(x) = \frac{1}{x - \frac{x}{\sqrt{x}}}$ и функция

$g(x) = \frac{1}{\ln(x)}$ дают очень близкие результаты, а при больших значениях x становятся эквивалентными (рис. 2).

Поэтому формулу (13) можно записать в виде

$$\pi(n) \sim \int_2^n \frac{dx}{\ln(x)}. \quad (16)$$

Получили результат, доказанный Чебышевым в 1848 году, согласно которому количество простых чисел, не превосходящих x , хорошо приближается функцией $Li(x)$ и что $\frac{\pi(x)}{Li(x)} \rightarrow 1$ при $x \rightarrow +\infty$ [12].



■ $y(x) = \frac{1}{x - \frac{x}{\sqrt{x}}}$

Показать таблицу точек

■ $y(x) = \frac{1}{\ln(x)}$

Показать таблицу точек

Рис. 2. Графики функций $f(x) = \frac{1}{x - \frac{x}{\sqrt{x}}}$ и $g(x) = \frac{1}{\ln(x)}$.

Заключение

Таким образом, в данной работе получена новая формула средних интервалов между простыми числами. При помощи графиков функций и численных расчетов на классическом компьютере показано, что это выражение согласуется с теоремой о распределении простых чисел, поэтому можно дать альтернативную формулировку этой теоремы. Также в работе дана оценка вероятности того, что наугад выбранное из отрезка $[1;n]$ натуральное число окажется простым и приведены достаточно точные формулы для оценки количества простых чисел на отрезке $[1;n]$, одна из которых по точности превосходит сдвинутый интегральный логарифм.

Список литературы

1. <https://oeis.org/A001223>
2. <https://mathworld.wolfram.com/PrimeNumberTheorem.html>
3. Бухштаб А.А. Теория чисел. Москва: издательство «ПРОСВЕЩЕНИЕ», 1966, стр. 333-334.
4. Г. Диамонд. Элементарные методы в изучении распределения простых чисел//Успехи математических наук, 1990, том 45, выпуск 2, стр. 79-114.
5. Steven R. Finch. Mathematical constants. Cambridge University Press, 2003, pp. 28-34.
6. Robin, G. (1983). "Sur l'ordre maximum de la fonction somme des diviseurs". Séminaire Delange–

Pisot–Poitou, Théorie des nombres (1981–1982). Progress in Mathematics. 38: 233–244.

7. <https://mathworld.wolfram.com/Euler-MascheroniConstant.html>

8. Письменный Д. Т. Конспект лекций по высшей математике: полный курс. М.:АЙРИС-пресс, 2020, стр. 466.

9. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. М.: Издательство АСТ, 2019, стр. 376.

10. Перфильев М.С. Некоторые закономерности гипотезы Римана/Математика, ее приложения и математическое образование

(МПМО17): Материалы VI Международной конференции. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2017, стр. 295-300.

11.

<https://mathworld.wolfram.com/RiemannHypothesis.html>

12. Современные проблемы математики/Математический институт им. В.А.Стеклова РАН (МИАН).-Москва: МИАН, 2008. Вып. 11: Конференция «Леонард Эйлер и современная математика» (МИАН, 17 мая 2007 года). Сборник докладов, стр. 27-28.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

A REVIEW OF BENCHMARKS FOR EVALUATING THE MATHEMATICAL ABILITIES OF MODERN LLM IN ADVANCED PROBLEM SOLVING

Piastou Mikita

University of West Georgia,

30 Mahogany Mews SE, Calgary AB, Canada T3M 3H4,

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2024.1.125.2131

ABSTRACT

This paper presents a review of the existing benchmarks used to evaluate the mathematical problem-solving abilities of LLMs. It is found that, despite the widespread use of benchmarks such as GSM8K, MATH, MMLU and MMLU-Pro, most of them are obsolete due to the significant progress of advanced models such as OpenAI o1, which achieve near-perfect accuracy in such tasks. These benchmarks, despite their contribution to LLM development, no longer possess sufficient sophistication to adequately assess the capabilities of advanced models. It is demonstrated that MathVista requires enhancements, incorporating sophisticated visual components, which would transform it into a potent instrument for evaluating multimodal AI capabilities. Among the various benchmarks, FrontierMath distinguishes itself by its distinctive challenges, which advanced models are unable to solve, thus highlighting their limitations and pointing to areas for enhancement. Consequently, FrontierMath emerges as a novel benchmark for assessing the mathematical prowess of LLMs.

Keywords: AI, math problem, benchmarks, neural network, machine learning, LLM, research.

Introduction

The application of contemporary artificial intelligence (AI) models has become pervasive, encompassing diverse domains of human activity. These include, but are not limited to, education, manufacturing, scientific research, medicine, industry, and business. A pressing challenge in the development of AI systems pertains to the capacity to address complex mathematical problems. The most prevalent large language models (LLMs) – GPT-o1, Gemini, Grok, PaLM 2, Claude and LLaMA – have demonstrated the capacity to effectively solve straightforward problems. Studies have shown that these models possess the capability to solve problems in various fields, including mathematics, physics, chemistry, and other exact sciences, at a level comparable to that of a middle school, high school, or honours student, provided that the user possesses proficiency in prompt engineering and employs specific query techniques [1]. Specialised models, such as Google AlphaProof and AlphaGeometry 2, have been shown to be capable of solving problems at the level of a silver medalist in the most difficult International Olympiad in Mathematics (IMO) due to the means of Lean4 formal proofs [2, 3]. The enhancement of mathematical prowess in such models holds considerable promise for the educational process, wherein artificial intelligence can demonstrate remarkable efficacy in facilitating comprehension and learning in academic settings, as well as in the execution and creation of mathematical tasks [4]. Another significant domain in which high problem-solving abilities are imperative pertains to applied and fundamental scientific research, intricate mathematical sections, and even the prediction of a physical experiment or fundamental theory, where advancements have already been made [5].

In this regard, the issue of objective and relevant evaluation of the mathematical capabilities of models is acute [6,7,8]. The evaluation process employs

specialised benchmarks, though these are currently limited in number and encounter certain challenges. The purpose of this review study is therefore twofold: firstly, to evaluate the relevance of existing benchmarks for assessing the mathematical capabilities of AI models; and secondly, to consider their problems.

Methods and materials

This paper employed contemporary methodologies to analyse and systematise open-source data on mathematical benchmarks, which were developed to evaluate LLM capabilities. The following materials and methods were used to compile the review:

1. Research database: The primary source of information was research articles published on the Arxiv.org platform, which contain the most up-to-date data on benchmarks and their testing. Furthermore, peer-reviewed publications from English-language scientific journals indexed in Scopus were utilised, along with official GitHub pages of benchmarks.

2. The selection of materials was based on the relevance of the materials to the topic of LLM maths assessment. The review covered only publicly available benchmarks created no earlier than 2020.

3. Analysis methodology: Benchmarks were categorised by complexity and areas of mathematics covered. Key applications, LLM test results, and advantages and disadvantages were evaluated. The Mathematics Subject Classification (MSC) was employed to systematise the mathematical disciplines. Finally, data from publications and source repositories were analysed in a comparative format, highlighting common trends and unique aspects of each benchmark.

Results of the study and discussion

In the context of the extant large mathematical benchmarks, a further consideration is warranted of some of the aforementioned, namely GSM8K, MR-GSM8K, MATH, Omni-Math, OlympiadBench, PutnamBench, MiniF2F, AIMO and AIME, U-MATH, FrontierMath. Table 1 provides a concise overview of

the salient characteristics and features of these benchmarks. Subsequently, we will provide data on each of the aforementioned benchmarks and the test results of modern LLMs.

Table 1

Characteristics of the considered mathematical benchmarks.

| Benchmark | Dataset volume | Dataset features | MSC Classification | Metrics |
|-----------------------|----------------|-------------------------------------|---|----------------------------------|
| GSM8K [9] | 8500 | Grade-School Math | 97A40, 97H40 | Accuracy |
| MR-GSM8K [10] | 3000 | Grade-School Math | 14A25, 11A, 97A40, 15A, 51M, 05A, 60A, 26A | MR-Score |
| MATH [11] | 12500 | Advanced math problem | 11A, 97A40, 12E, 15A, 51M, 05A, 60A, 26A | Accuracy |
| Omni-Math [12] | 4428 | Olympiad-Level Math | 11A, 12E, 13A, 15A, 11D, 11E, 52A, 05C, 28A, 60A, 62A, 97K20, 68R01, 03B, 68T50 | Accuracy with detail, Omni-Judge |
| OlympiadBench [13] | 8476 | Olympiad-Level Math | 12E, 97H60, 11B, 97A, 51M, 97G40, 05A, 97K30 | Accuracy |
| PutnamBench [14] | 1692 | Formalized Theorem-Proving | 11A, 11B, 12E, 15A, 05C, 97K20, 26A, 28A | Pass@n |
| MiniF2F [15] | 488 | Formalized Theorem-Proving | 51M, 97G40, 12E, 97H60, 11A, 11B | Pass@n |
| AIMO (AIME*) [16, 19] | 110 | Intermediate-Level High School Math | 12E, 97H60, 11B, 97A, 51M, 97G40, 05A, 97K30 | Accuracy |
| MathVista [17] | 6141 | Visual/Math QA | 12E, 15A, 51M, 97G40, 68U05, 05A, 62A, 60A, | Accuracy |
| MMLU-Pro [18] | >200* | Multitask | 97A, 11A, 97A40, 12E, 15A, 51M, 05A, | Accuracy, Pass@n |
| FrontierMath [20] | >200 | Extra-Advanced Math | 11, 05, 20, 60, 15, 14, 33, 55, 12, 30, 68, 18, 57, 13, 53, 54, 35, 42, 41, 52, 82, 44, 17, other | Accuracy |
| U-MATH [30] | 1100 | University level | 15A, 12E, 26A, 28A, 97I40, 26B, 53C, 40A, 97I10, 97I20 | Accuracy |

GSM8K and MR-GSM8K [9, 10] are benchmarks designed to evaluate the LLM's ability to solve mathematical problems of simple complexity. The tasks in these benchmarks encompass basic arithmetic operations, elementary algebra, interest problems and other tasks that are straightforward for LLMs to formulate. The collection comprises over 8500 tasks, with 7500 allocated for training and the remaining 1000 for the evaluation of LLM capabilities. The citation frequency of GSM8K has been increasing steadily, with 39 citations in 2022, 332 in 2023, and 834 in 2024. This growing interest from researchers demonstrates the value of GSM8K in training basic computations and step-by-step solutions for new language models. The performance metric of this model is Accuracy. GPT-4o has been shown to achieve 96% accuracy on GSM8K, while GPT-3.5 has demonstrated a rate of over 85%, and Qwen2-72B has achieved approximately 89.5% [21]. It is noteworthy that the evaluation of newer and more advanced models is not conducted using this particular benchmark. This is due to the fact that these models demonstrate near-perfect performance in addressing all challenges, thus necessitating the use of

more intricate mathematical problems for the purpose of assessment.

MR-GSM8K represents an enhancement to the earlier version GSM8K, with the objective of training the model to comprehend the logical sequence of steps, identify errors, analyse them and correct them, i.e. meta-evaluate solutions. MR-GSM8K utilised a distinct metric, MR-Score, comprising three sub-metrics: solution classification accuracy, accuracy in identifying the initial erroneous step, and error justification. As illustrated in Figure 1, a comparative analysis of the metrics for GSM8K and MR-GSM8K is presented for several LLMs [10, 22]. It is evident that MR-GSM8K exhibits superiority over its predecessor in numerous aspects, facilitating enhanced evaluation of several models, including o1, o1-preview, GPT40, Gemini 1.5 Pro, Grok 2, and others. However, it should be noted that the GSM8K and MR-GSM8K tasks are significantly simplified compared to real mathematical and scientific problems, and only cover low and medium complexity problems. This is clearly insufficient for solving fundamental and applied scientific problems.

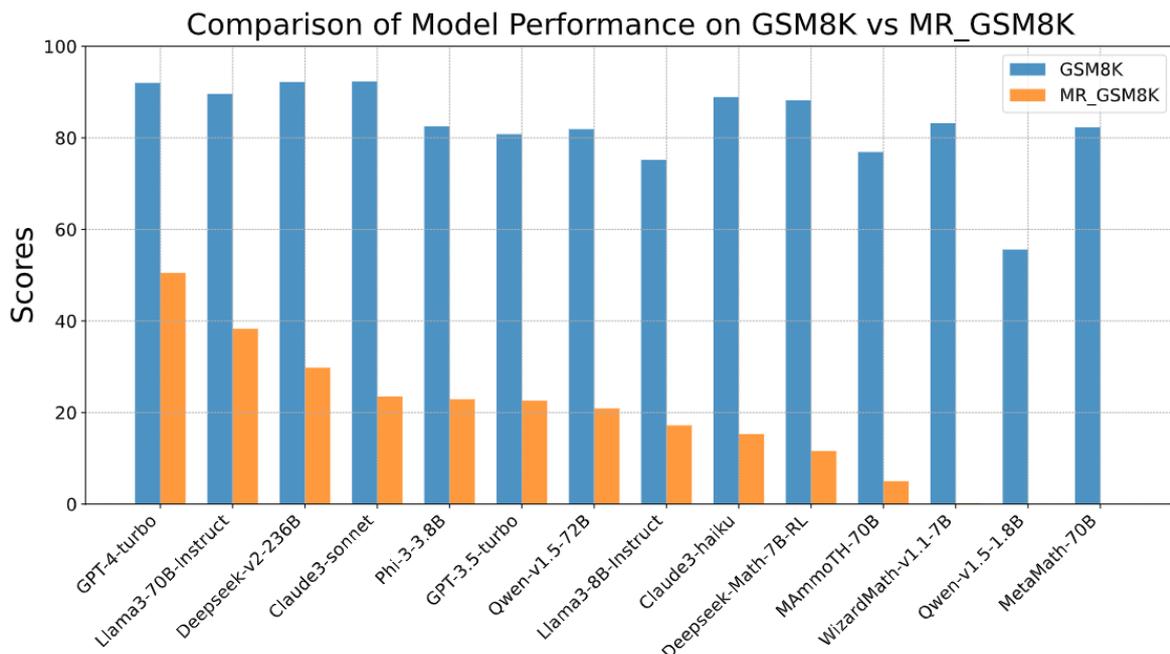


Figure 1 - Comparison of LLM tests on GSM8K and MR-GSM8K benchmarks based on Accuracy and MR-Score metrics [10].

The MATH benchmark problems consist of problems from mathematics competitions such as AMC 10, AMC 12, and the AIME. These problems encompass a wide range of mathematical disciplines, including algebra, number theory, combinatorics, and probability, as well as geometry and calculus. The complexity of the problems varies significantly, with some being very elementary, while others are considered to be highly sophisticated. The solutions to these problems are presented in the LaTeX format and may include graphical visualisations created using the Asymptote software. The citation frequency of MATH

has been increasing steadily, with 15 citations in 2021, 32 in 2022, 170 in 2023, and 486 in 2024. While it is less frequently cited than GSM8K, it does offer a more challenging set of tasks. It is noteworthy that the advanced models also demonstrate a high level of proficiency in addressing the benchmark tasks. As illustrated in Figure 2, there has been a steady progression from 2022 to 2024, with the o1 model achieving the highest benchmark at the time of publication at 94.8%, closely followed by Gemini 2.0 Flash Experimental with Accuracy 89.7% [23].

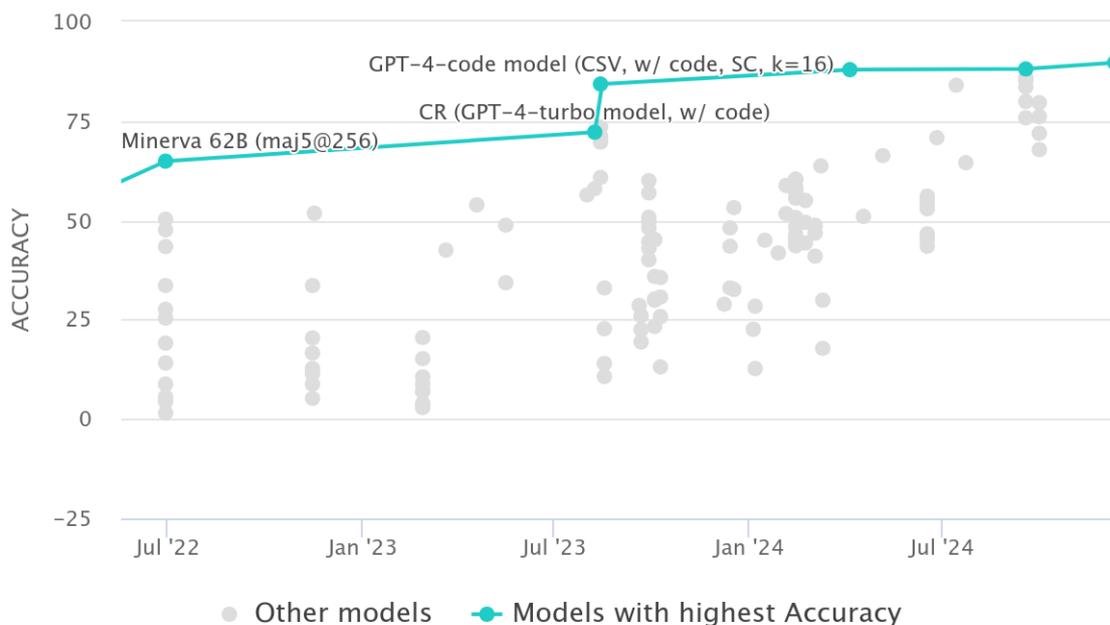


Figure 2 - Leaderboard LLM on passing the MATH benchmark [23].

Omni-MATH has been developed for the purpose of evaluating the mathematical aptitude of LLMs at the Olympiad level. It comprises problems that require complex reasoning and proofs. The benchmark dataset encompasses GSM8K, MATH, JEEBench, OlympicArena, IMO, IMC, Putnam, USAMO, IZHO, JBMO and other Olympiad tasks in general algebra, calculus, geometry, discrete mathematics and number theory, and applied mathematics, which are further divided into 10 difficulty classes [24]. The primary metrics employed are Accuracy, with granularity by domain and complexity level, and Omni-Judge. The record is currently held by OpenAI o1-mini, which achieved an average score of 60.54% across all task areas. Furthermore, the testing phase revealed that o1-mini attained 51.50% in geometry and 37.68% in discrete mathematics. In the second position, Qwen2.5.5-MATH-Instruct, with a significant margin of almost 1.5-2 times, demonstrates its close second-place standing. These results indicate that Omni-MATH remains a pertinent evaluation tool for assessing the capabilities of most models in addressing advanced problems, although no estimates for OpenAI o1 have been provided to date.

OlympiadBench has been developed as a multimodal bilingual (English and Chinese) high-level benchmark. It comprises 8,476 problems, of which 79% are open-ended questions (e.g. theorems), 21% are proof problems in mathematics (6,142 problems) and physics (2,334 problems), and 57% of the problems include images (graphs, diagrams). The problem sources include international Olympiads (IMO, IPHO) and Chinese national exams (GaoKao). The models were evaluated in two distinct ways. Firstly, their capacity to address all tasks was assessed. Secondly, their proficiency in physics and mathematics was evaluated on an individual basis. The models were also tested in scenarios that included textual descriptions of the tasks and in multimodal mode. The ensuing results are as follows [25]:

- GPT-4o: 32.48% in maths, 13.10% in physics, 25.89% average;
- GPT-4V: 21.70% in maths, 10.74% in physics, 17.97% average;
- Qwen-VL-Max: 12.65% in maths, 5.09% in physics, 10.09% average;
- Claude3-Opus: The mean score for mathematics was 9.06%, for physics 4.93%, and the average was 7.65%.

It is evident that the results of the other models are lower. It is noteworthy that the OpenAI o1 model has not yet been subjected to empirical evaluation. This finding indicates that the prevailing models encounter challenges in addressing problems characterised by multimodal components, with physics problems being particularly difficult due to improper application of physical theory. A notable strength of OlympiadBench is its provision of comprehensive solution annotations, a feature that sets it apart from other models.

In contradistinction to other benchmarks under consideration, PutnamBench has been designed to evaluate neural and symbolic theorem-proving methods on complex problems. The tasks were derived

from the William Lowell Putnam Mathematical Competition. The dataset under consideration is comprised of 640 problems, with 1692 formalisations in three formal proof languages: Lean 4, Isabelle, and Coq. In addition to Table 1, it can be noted that the dataset consists of 253 algebra problems, 226 number theory problems, 107 geometry problems, 68 linear algebra problems, 51 abstract algebra problems, 28 combinatorics problems, 17 set theory problems and 17 probability theory problems. The metric employed was Pass@n, which denotes the probability of successfully proving a problem in n attempts. The tasks are divided into two categories: those requiring a numerical solution and proof of its correctness, and those for proving the correctness of a ready-made solution. The findings of the model testing revealed that GPT-4o managed to complete only a single task in all formalisation languages with the pass@10 metric [26]. It is noteworthy that other LLMs are not presented in this study, and it should be acknowledged that automated theorem-proving systems demonstrate a superior ability in addressing such problems. For instance, the ABEL reinforcement system successfully solved seven problems in Lean with a pass@596 metric. Despite the absence of test results for o1, it can be concluded that LLMs currently demonstrate a degree of weakness in theorem-proving for complex problems, and are comparatively inferior to specialised systems. It is evident that a notable disadvantage associated with this PutnamBench is that prior to the resolution of a given problem, its formalisation is necessitated through the utilisation of tools such as Lean, Isabelle or Coq. This requirement renders the process unnecessarily cumbersome for practical implementation within scientific domains. In contrast, the employment of a natural formalisation approach through the use of a LLM offers a significantly more expeditious solution.

Another benchmark similar to PutnamBench is miniF2F. This benchmark also evaluates the capabilities of theorem-proving systems on Mathematical Olympiad-level problems formalised in Metamath, HOL Light, Lean and Isabelle. The problem domain and metrics are analogous, with a total of 488 problems. Test results: the GPT-f for Metamath showed Pass@1 = 1.3%, Pass@8 = 1.6%, for Lean: Pass@1 = 24.6%, Pass@8 = 29.2% [15]. In the context of MATH-based algebra problems, Lean GPT-f demonstrated proficiency in solving up to 10 problems of difficulty levels 3 and 4. In the domain of number theory, it exhibited success in low complexity problems but encountered challenges with level 5 problems. The limitations of this benchmark are consistent with those observed in PutnamBench, and it is noteworthy that it remains underutilised, with no new LLM models having been evaluated thus far.

The AI Mathematical Olympiad (AIMO) is a series of competitions whose objective is to develop an LLM capable of solving IMO-level problems written with LaTeX. The dataset encompasses 110 novel problems (of which 50 are publicly accessible), exhibiting a style and scope analogous to that of the AIME, yet with a level of complexity that falls between

that of the AIME and AMC'12. It is noteworthy that all problems are accompanied by numerical solutions, a feature that enhances the practicality and accessibility of the competition for participants. The competition and the benchmark in particular are of interest as participants develop models and non-standard solutions from scratch [16]. It has been demonstrated that GPT-4o is capable of solving 12% of AIME problems, while o1 achieved an average of 74% (11.1/15) with a single sample per problem, 83% (12.5/15) with consensus among 64 samples, and 93% (13.9/15) when re-ranking 1000 samples with a learned scoring function. A score of 13.9 places it among the top 500 students nationally and above the cutoff for the USA Mathematical Olympiad [19].

The objective of the MathVista programme is to evaluate the mathematical and visual capabilities of multimodal LLMs. As of 2024, the programme has been cited a total of 106 times in academic publications. The problem types encompass Figure Question Answering (FQA), Geometry Problem Solving (GPS), Math Word Problems (MWP), Textbook Question Answering (TQA), Visual Question Answering (VQA), and others. The generation of these problems has been undertaken from 28 existing multimodal datasets (9 MathQA, 19 VQA) and 3 new datasets (IQTest, FunctionQA, PaperQA). Accuracy is utilised as the metric. On average, humans achieve an accuracy of 60.3%, while advanced models demonstrate higher performance, with o1 achieving 73.9%, Pixtral Large (124B) at 69.4%, Grok-2 at 69.0%, Claude 3.5 Sonnet at 67.7%, Gemini 1.5 Pro (May 2024) at 63.9%, and GPT-4o at 63.8%. The findings suggest that, within the domain of visual task comprehension, MathVista is exhibiting a decline in its capacity to evaluate models. This underscores the necessity for the development of a novel benchmark that incorporates more advanced visual components into the composition of mathematical tasks. Furthermore, these results may signify that LLMs are approaching the threshold of their capabilities in terms of visual multimodal information processing in conjunction with mathematical tasks.

MMLU-Pro is a multidisciplinary benchmark for the assessment of language comprehension and complex reasoning. It superseded MMLU, a benchmark that had become obsolete, particularly in light of its near-flawless performance by advanced models such as GPT-4o (88.0%) and o1 (92.3%). In comparison with its predecessor, MMLU-Pro has increased the number of answers from four to ten, thereby reducing the probability of guesswork. It has also eliminated simple and erroneous questions and incorporated a two-stage correctness check of answers. The sources of the tasks included MMLU datasets (56.6%), STEM websites (33.9%), TheoremQA (4.97%), and SciBench (4.5%). The metrics employed include Accuracy and Pass@n. The ensuing test results are as follows: The results demonstrate that GPT-4o achieves a score of 76.1%, while Claude-3-Opus and GPT-4-Turbo both attain 65.3% and 65.2%, respectively. Llama-3-70B-Instruct, DeepSeek-V2-Chat, and Qwen1.5-72B-Chat all achieve scores of

59.8%, 57.6%, and 54.7%, respectively. It is noteworthy that tasks requiring extensive reasoning chains continue to pose significant challenges. The findings indicate that, despite the enhancements achieved, MMLU-Pro will rapidly become obsolete for LLM evaluation. The popularity of both its predecessor, which was cited more than 1370 times between 2020 and 2024, and MMLU-Pro itself, which was cited 39 times in six months, can be attributed to the large number of tasks and multidisciplinary [28, 29].

U-MATH is a recent addition to the field, with 1,100 tasks having been created on the basis of university course materials, of which 900 are text-based and 200 incorporate visual elements. The primary metric employed is Accuracy. For tasks incorporating visual elements and complex text solutions, the GPT-4o model is employed as a reference judge. The benchmark results are as follows: Gemini-1.5-Pro (63.4% accuracy for text tasks and 45% for visual tasks), Qwen2.5-Math (72B) (50.2% accuracy), and Llama-3.1 (70B) (28.5% accuracy for text tasks). As with the other benchmarks, the best performance was in algebra and the worst was in integral calculus. The benchmark results suggest that it is a reasonable fit for evaluating advanced models in complex mathematical disciplines.

The FrontierMath benchmark has been developed for the purpose of evaluating the LLM's capacity to resolve complex mathematical problems at the research level. The FrontierMath benchmark addresses the lacuna between standard Olympiad tasks and problems that demand a profound theoretical understanding. The problem types encompass research-level problems that necessitate the application of advanced techniques and methods. Automatic verification of numerical solutions or calculations via SymPy is employed to evaluate results, effectively eliminating guesswork due to the formidable complexity of the problems. The test results indicate that GPT-4o Claude 3.5 Sonnet and Gemini 1.5 Pro exhibited a failure rate of more than 2% in problem-solving, with other models demonstrating even lower performance metrics. A recent closed testing of the latest OpenAI o3 model demonstrated that it solves 25.2% of benchmark problems, thereby demonstrating a significant performance advantage over other models in mathematics and abstract reasoning [31]. A comparison of FrontierMath with other benchmarks is shown in Figure 3.

It is important to note that FrontierMath is distinctive in the field. It is compiled by professional mathematicians from around the world, and the tasks have been assessed by Fields Prize winners such as Terence Tao. The tasks are distinctive in that they encompass theorems and domains of knowledge that have not yet been explored by LLMs, such as Artin's primitive root theorem or select sections of field theory. LLMs encounter challenges such as the utilisation of heuristics in place of direct proofs and errors in task interpretation. The challenge with this standard, and with LLMs in general, is that the problem must be solved in a very short time, whereas FrontierMath problems can take both humans and LLMs a

considerable amount of time to solve, if only for hypothesis testing, while the context window of most LLMs is limited.

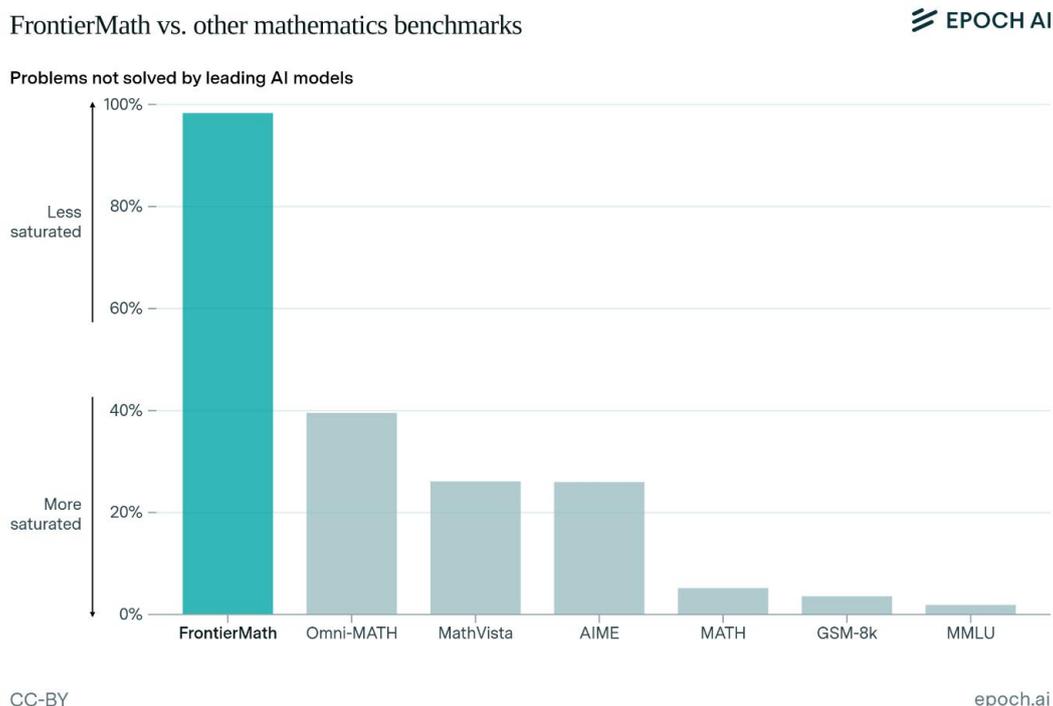


Figure 3 - Comparison of task volumes included in FrontierMath and other maths benchmarks.

Conclusion

A thorough analysis of mathematical benchmarks was conducted to assess the capabilities of advanced LLMs. The analysis revealed that the majority of existing LLMs are obsolete due to their inability to distinguish high-level models. GSM8K, MATH, MMLU and MMLU-Pro have all but exhausted their relevance. PutnamBench and miniF2F are sufficiently sophisticated for LLMs, but the need for formalisation limits the scope for further development and scaling. The MathVista benchmark signifies a significant advancement in the integration of multimodal tasks; however, its full potential remains unrealised due to the restricted complexity of the visual components. The incorporation of more diverse and complex graphs, tables and charts has the potential to significantly enhance its value for testing models with multimodal capabilities. Benchmarks such as U-MATH, MR-GSM8K, AIMO, OlympiadBench, and Omni-MATH maintain their relevance and can be utilised for advanced LLMs.

Among all those reviewed, FrontierMath stands out as the most promising assessment tool. It sets a new standard of complexity for AI models and should become the benchmark for future research and development in this area. This underscores the necessity to explore and develop novel approaches that extend beyond conventional scaling methods, such as the integration of symbolic processes and the enhancement of deductive capabilities within models.

Literature

- Schorcht, S. Prompt the problem – investigating the mathematics educational quality of AI-supported problem solving by comparing prompt techniques / S. Schorcht, N. Buchholtz, L. Baumanns. – Text : electronic // *Frontiers in Education*. – 2024. – T. 9. – C. 1386075. – URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/educ.2024.1386075/full> (date accessed: 12.12.2024).
- AI achieves silver-medal standard solving International Mathematical Olympiad problems // Google DeepMind URL: <https://deepmind.google/discover/blog/ai-solves-imo-problems-at-silver-medal-level/> (date accessed: 10.12.2024).
- Tang, X. Mathematical Formalized Problem Solving and Theorem Proving in Different Fields in Lean 4 / X. Tang. – arXiv, 2024. – URL: <https://arxiv.org/abs/2409.05977> (date accessed: 12.12.2024). – Text : electronic.
- Schorcht, S. Prompt the problem – investigating the mathematics educational quality of AI-supported problem solving by comparing prompt techniques / S. Schorcht, N. Buchholtz, L. Baumanns. – Text : electronic // *Frontiers in Education*. – 2024. – T. 9. – C. 1386075. – URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/educ.2024.1386075/full> (date accessed: 12.12.2024).
- Will Artificial Intelligence Revolutionize the Exploration of Physics by Uncovering New Laws? // AI for social good URL: <https://aiforsocialgood.ca/blog/will-artificial->

intelligence-revolutionize-the-exploration-of-physics-by-uncovering-new-laws (date accessed: 10.12.2024).

6. Advancing mathematics by guiding human intuition with AI / A. Davies, P. Veličković, L. Buesing [et al.]. – Text : electronic // Nature. – 2021. – Vol. 600. – № 7887. – P. 70-74. – URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-021-04086-x> (date accessed: 21.12.2024).

7. Opesemowo, O. A. G. Artificial intelligence in mathematics education: The good, the bad, and the ugly / O. A. G. Opesemowo, M. Ndlovu. – Text : electronic // Journal of Pedagogical Research. – 2024. – Artificial intelligence in mathematics education. – P. 3. – URL: <https://www.ijopr.com/article/artificial-intelligence-in-mathematics-education-the-good-the-bad-and-the-ugly-14735> (date accessed: 21.12.2024).

8. Mukherjee, A. AI Knowledge and Reasoning: Emulating Expert Creativity in Scientific Research. AI Knowledge and Reasoning / A. Mukherjee, H. H. Chang. – arXiv, 2024. – URL: <https://arxiv.org/abs/2404.04436> (date accessed: 21.12.2024). – Text : electronic.

9. Cobbe K. et al. Training verifiers to solve math word problems //arXiv preprint arXiv:2110.14168. – 2021.

10. MR-GSM8K: A Meta-Reasoning Benchmark for Large Language Model Evaluation. MR-GSM8K / Z. Zeng, P. Chen, S. Liu, [and others]. – arXiv, 2023. – URL: <https://arxiv.org/abs/2312.17080> (date accessed: 12.12.2024). – Text : electronic.

11. Hendrycks D. et al. Measuring mathematical problem solving with the math dataset //arXiv preprint arXiv:2103.03874. – 2021.

12. Omni-MATH: A Universal Olympiad Level Mathematic Benchmark For Large Language Models. Omni-MATH / B. Gao, F. Song, Z. Yang, [and others]. – arXiv, 2024. – URL: <https://arxiv.org/abs/2410.07985> (date accessed: 12.12.2024). – Text : electronic.

13. He C. et al. Olympiadbench: A challenging benchmark for promoting agi with olympiad-level bilingual multimodal scientific problems //arXiv preprint arXiv:2402.14008. – 2024.

14. Tsoukalas G. et al. Putnambench: Evaluating neural theorem-provers on the putnam mathematical competition //arXiv preprint arXiv:2407.11214. – 2024.

15. Zheng K., Han J. M., Polu S. Minif2f: a cross-system benchmark for formal olympiad-level mathematics //arXiv preprint arXiv:2109.00110. – 2021.

16. XTX Investments. AI Mathematical Olympiad - Progress Prize 1. <https://kaggle.com/competitions/ai-mathematical-olympiad-prize>, 2024. Kaggle.

17. MathVista: Evaluating Mathematical Reasoning of Foundation Models in Visual Contexts. MathVista / P. Lu, H. Bansal, T. Xia, [and others]. –

arXiv, 2023. – URL: <https://arxiv.org/abs/2310.02255> (date accessed: 12.12.2024). – Text : electronic.

18. MMLU-Pro: A More Robust and Challenging Multi-Task Language Understanding Benchmark. MMLU-Pro / Y. Wang, X. Ma, G. Zhang, [and others]. – arXiv, 2024. – URL: <https://arxiv.org/abs/2406.01574> (date accessed: 10.12.2024). – Text : electronic.

19. Learning to Reason with LLMs // Open AI URL: <https://openai.com/index/learning-to-reason-with-llms/> (date accessed: 10.12.2024).

20. Glazer E. et al. Frontiermath: A benchmark for evaluating advanced mathematical reasoning in ai //arXiv preprint arXiv:2411.04872. – 2024.

21. GSM8K // paperswithcode URL: <https://paperswithcode.com/dataset/gsm8k> (date accessed: 14.12.2024).

22. MR-GSM8K - A Novel Benchmark for Evaluating Reasoning in LLMs // GitHub URL: <https://github.com/dvlab-research/MR-GSM8K?ysclid=m4plejazat815823838> (date accessed: 14.12.2024).

23. Math Word Problem Solving on MATH // paperswithcode URL: <https://paperswithcode.com/sota/math-word-problem-solving-on-math> (date accessed: 14.12.2024).

24. Omni-MATH: A Universal Olympiad Level Mathematic Benchmark for Large Language Models // GitHub URL: <https://omni-math.github.io/> (date accessed: 14.12.2024).

25. OlympiadBench // GitHub URL: <https://github.com/OpenBMB/OlympiadBench?ysclid=m4xu2s3p6274835584> (date accessed: 17.12.2024).

26. PutnamBench Leaderboard // trishullab.github.io URL: <https://trishullab.github.io/PutnamBench/leaderboard.html> (date accessed: 17.12.2024).

27. MathVista Evaluating Math Reasoning in Visual Contexts // GitHub URL: <https://mathvista.github.io/> (date accessed: 17.12.2024).

28. MMLU (Massive Multitask Language Understanding) // paperswithcode URL: <https://paperswithcode.com/dataset/mmlu> (date accessed: 17.12.2024).

29. MMLU-Pro // paperswithcode URL: <https://paperswithcode.com/dataset/mmlu-pro> (date accessed: 17.12.2024).

30. U-MATH: A University-Level Benchmark for Evaluating Mathematical Skills in LLMs. U-MATH / K. Chernyshev, V. Polshkov, E. Artemova, [and others]. – arXiv, 2024. – URL: <https://arxiv.org/abs/2412.03205> (date accessed: 21.12.2024). – Text : electronic.

31. OpenAI o3 and o3-mini—12 Days of OpenAI: Day 12 // YouTube URL: <https://www.youtube.com/watch?v=SKBGlsqdyIU> (date accessed: 21.12.2024).

**РАЗРАБОТКА WebGL РЕНДЕРА ПЕРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
Lottie АНИМАЦИИ**

*Михайлюк Степан Денисович
lumen5 technologies ltd
Главный разработчик*

**DEVELOPING A WebGL RENDERER TO IMPROVE THE PERFORMANCE OF
Lottie ANIMATION**

*Mikhailiuk Stepan Denisovich
lumen5 technologies ltd
Principal Software Engineer*

АННОТАЦИЯ

В статье исследуется внутренняя структура формата Lottie и предлагается альтернативный подход к рендерингу анимации с помощью WebGL. Подробно рассматривается процесс создания простой анимации в After Effects, ее экспорт в формат Lottie JSON с помощью плагина Bodymovin, анализ полученной структуры данных и, наконец, реализация собственного рендера WebGL. Демонстрируется разбор JSON-данных, генерация геометрии, применение трансформаций и рендеринг с использованием WebGL API. В статье также затрагиваются вопросы оптимизации производительности WebGL-рендера на примере кэширования геометрии и пакетной обработки. В заключение приводится сравнение предложенного решения с lottie-web, подчеркивающее преимущества WebGL-рендеринга в контексте WebGL-приложений и открывающее новые возможности для использования Lottie в интерактивных веб-проектах.

ABSTRACT

This paper explores the internal structure of the Lottie format and proposes an alternative approach to rendering animations using WebGL. The process of creating a simple animation in After Effects, exporting it to the Lottie JSON format using the Bodymovin plugin, analyzing the resulting data structure, and finally implementing your own WebGL renderer is discussed in detail. It demonstrates JSON data parsing, geometry generation, applying transformations and rendering using WebGL API. The paper also touches upon WebGL renderer performance optimization issues using geometry caching and batch processing as examples. Finally, a comparison of the proposed solution with lottie-web is presented, emphasizing the advantages of WebGL rendering in the context of WebGL applications and opening new opportunities for using Lottie in interactive web projects.

Ключевые слова: Lottie; WebGL; рендеринг анимации; производительность; оптимизация; After Effects; JSON.

Keywords: Lottie; WebGL; animation rendering; performance; optimization; After Effects; JSON.

JEL classification: O30; C80; C02; Z10.

Введение

Актуальность данной работы обусловлена растущей потребностью в эффективных методах отображения высококачественной анимации в веб-приложениях, особенно по мере их усложнения. Благодаря своей простоте и гибкости формат Lottie стал популярным решением для создания веб-анимации. Однако существующие инструменты, такие как библиотека lottie-web, ограничены в своих возможностях при работе с WebGL — графическим API, обеспечивающим аппаратное ускорение и высокую производительность рендеринга. Это ограничение особенно заметно в приложениях с интенсивным использованием WebGL, таких как 2D-игры, где рендеринг анимации Lottie с использованием традиционных методов (холст, SVG) может стать «узким» местом и отрицательно повлиять на общую производительность.

Разработка специального средства рендеринга анимации WebGL Lottie преодолевает это ограничение и значительно повышает

эффективность рендеринга анимации в приложениях WebGL. Это открывает новые возможности для интеграции сложной анимации в игры, интерактивные визуализации и другие веб-проекты, требующие высокопроизводительной графики. Предложенное решение позволяет в полной мере использовать возможности WebGL, включая аппаратное ускорение и эффективную работу с большим количеством объектов, что позволяет создавать более гибкие, динамичные и визуально насыщенные веб-приложения. Кроме того, изучение внутренней структуры формата Lottie и разработка собственного рендера позволяет лучше понять принципы работы этой технологии, а также определить пути дальнейшей оптимизации и расширения ее возможностей.

Тем самым, **научная новизна** исследования заключается в разработке и реализации оригинального WebGL-рендера для анимации Lottie, который, в отличие от существующих решений, напрямую использует возможности WebGL для воспроизведения. Иными словами,

созданный рендерер не требует использования промежуточных форматов, таких как canvas или SVG. Это существенно снижает накладные расходы и позволяет более эффективно использовать ресурсы графического процессора. В результате достигается заметный прирост производительности, особенно в WebGL-приложениях с большим количеством анимированных объектов. Кроме того, новизна проявляется в детальном анализе структуры Lottie JSON и предложении оптимизированного алгоритма обработки данных для WebGL-рендеринга — данный подход также открывает новые возможности для интеграции Lottie в существующие WebGL-движки и фреймворки.

Цель исследования — разработка высокопроизводительного WebGL рендерера для анимации Lottie, способного эффективно обрабатывать сложные анимации и обеспечивать плавное воспроизведение в веб-приложениях, использующих WebGL, а также преодоление ограничений существующих решений, таких как lottie-web, которые не поддерживают нативный рендеринг на WebGL и могут приводить к снижению производительности, особенно в приложениях с интенсивным использованием графики, например, 2D-играх. **Предметом исследования** является структура данных Lottie JSON и ее эффективная интерпретация для рендеринга с помощью WebGL. Статья фокусируется на преобразовании анимационных данных Lottie, включая ключевые кадры, трансформации (положение, вращение, масштаб, прозрачность) и кривые Безье, в формат, совместимый с WebGL. Особое внимание уделяется различным типам слоев Lottie и особенностям их представления в JSON.

Материалы и методы исследования. В статье применяется комбинированная методология, сочетающая анализ, экспериментальную разработку и тестирование. Данная методология включает в себя несколько этапов и начинается с глубокого анализа структуры Lottie JSON, включая изучение спецификации формата, исследование представления различных типов слоев, трансформаций (положение, вращение, масштаб, прозрачность), ключевых кадров и кривых Безье. Далее следует этап экспериментальной разработки WebGL рендерера, где создается алгоритм парсинга Lottie JSON и проходит его преобразование в геометрические примитивы WebGL. Затем разрабатывается логика применения анимационных трансформаций к сгенерированной геометрии с использованием WebGL API. Для оценки эффективности разработанного рендерера проводится экспериментальное тестирование с набором анимаций различной сложности. Полученные результаты сравниваются с производительностью библиотеки lottie-web, и, наконец, применяется профилирование кода для выявления узких мест в производительности разработанного рендерера и их последующей оптимизации. В качестве

материалов и инструментов разработки используются Adobe After Effects, плагин Bodymovin для экспорта анимации в Lottie JSON, JavaScript для реализации WebGL рендерера, WebGL API для работы с графикой и инструменты для профилирования производительности JavaScript-кода.

Результаты исследования и их обсуждение

Изначально Lottie представлял собой специализированное решение для конвертации анимационных проектов, созданных в Adobe After Effects, в формат, пригодный для воспроизведения на различных целевых платформах. Эволюционируя со временем, он трансформировался в самостоятельную спецификацию, не ограничиваясь терминологией и экосистемой Adobe After Effects. Этот шаг стал важным шагом в переходе от использования проприетарного инструмента к открытому стандарту. Это способствовало тому, что он получил широкое распространение и был успешно интегрирован в различные среды разработки. Как показывают исследования, независимость от конкретного программного обеспечения позволила Lottie выйти за рамки узкоспециализированного решения и занять более широкую нишу в области цифровой анимации (Tang, 2023).

Недавнее появление плагина LottieFiles для Figma стало катализатором дальнейшего роста популярности и расширения потенциальных возможностей формата Lottie. Этот интеграционный шаг продемонстрировал готовность Lottie к взаимодействию с популярными инструментами дизайна, что, в свою очередь, значительно упростило процесс создания анимаций и их внедрения в различные проекты (Liu et al., 2024). Подобное развитие событий указывает на тенденцию Lottie к становлению де-факто стандартом в индустрии цифровой анимации, что, несомненно, является положительным моментом для сообщества разработчиков и дизайнеров, стремящихся к эффективному созданию и внедрению анимационных элементов.

Несмотря на повсеместно отмечаемую простоту использования и удобство Lottie, важно сместить акцент на возникающие при его применении технические проблемы и ограничения. Хотя большинство статей и публикаций акцентируют внимание на преимуществах и легкости интеграции, необходимо проанализировать потенциальные сложности, возникающие в процессе работы с этим форматом, особенно в сложных и ресурсоемких проектах. Такой анализ позволит нам выявить области, где Lottie нуждается в доработке и оптимизации, а также определить наиболее эффективные подходы к его использованию в различных частях разработки.

1. Структура Lottie JSON

Для начала проведем всесторонний анализ структуры JSON-файла, который является результатом экспорта анимации из Adobe After Effects посредством плагина Bodymovin (Munro,

2024). Этот JSON-файл, лежащий в основе формата Lottie, служит контейнером для всего спектра информации, необходимой для корректного воспроизведения анимации на различных платформах (Bourhis et al., 2020). Наша цель — не просто описать структуру, но и понять ее назначение, чтобы в дальнейшем эффективно использовать ее при разработке собственного рендера на WebGL. Начнем с рассмотрения корневого объекта — верхнего уровня иерархии, содержащего общие метаданные анимации.

Ключевые поля верхнего уровня, которые определяют общие параметры анимации, включают в себя: *v* (version) — версию формата Lottie, позволяющую отслеживать изменения в спецификации; *fr* (frameRate) — частоту кадров анимации, определяющую количество кадров в секунду; *ip* (inPoint) — начальный кадр анимации; *op* (outPoint) — конечный кадр анимации; *w* (width) — ширину анимационной области; *h* (height) — высоту анимационной области; *nm* (name) — имя анимации, присвоенное ей в After Effects, и *ddd* (has3d) — флаг, указывающий на наличие в анимации 3D-слоев. Эти поля предоставляют базовую информацию о временных рамках, размерах и общей структуре анимации. На этом уровне также присутствуют массивы *assets*, *layers* и *markers*, каждый из которых отвечает за определенный тип данных, используемых в анимации. Нам в первую очередь интересуют массив *layers*, так как именно в нем содержится информация о каждом слое анимации.

Каждый слой включает в себя ряд свойств, определяющих его тип (*ty*), имя (*nm*), индекс (*ind*), порядок следования (*sr*), а также другие параметры. К примеру, *ty*: 0 — Composition, 1 — Solid, 2 — Image, 3 — Null, 4 — Shape, 5 — Text. Важнейшим свойством каждого слоя является объект *ks*, представляющий собой «transform» объект. Именно объект *ks* определяет анимацию преобразований слоя, включающих положение (*p*), поворот (*r*), масштаб (*s*), прозрачность (*o*) и опорную точку (*a*). Этот объект содержит все необходимые данные для анимирования этих свойств во времени. В зависимости от типа слоя и его конфигурации, JSON-объект слоя может содержать и другие свойства, описывающие цвет, размер, маски и другие параметры слоя.

Объект *ks* (transform) является сердцем анимации каждого слоя, поскольку именно в нем содержатся все данные о его трансформациях. Он состоит из подобъектов, которые описывают различные параметры преобразований: *o* (opacity — прозрачность), *r* (rotation — поворот), *p* (position — положение), *a* (anchor point — опорная точка) и *s* (scale — масштаб). Каждый из этих подобъектов может содержать либо статичное значение (*k*), либо массив ключевых кадров. Если свойство анимировано, то массив *k* содержит объекты, описывающие ключевые кадры, каждый из которых, помимо значения, может также включать в себя контрольные точки кривых Безье для интерполяции между кадрами. Важно отметить,

что расположение свойств в объекте *ks* может быть как объединенным (например, *p* содержит координаты *x* и *y* в одном объекте), так и разделенным (свойства *x* и *y* положения содержатся в отдельных объектах).

Ключевые кадры и механизм их интерполяции — это основа плавных и сложных анимаций. Каждый ключевой кадр в Lottie JSON представлен объектом, содержащим данные о времени (*t*), значении (*s*) анимируемого свойства, а также контрольных точках кривых Безье (*i*, *o*, *ti*, *to*) для определения характера интерполяции. *i* (in) — входящие контрольные точки Безье для скорости анимации, *o* (out) — исходящие контрольные точки Безье для скорости анимации, *ti* (inTangent) — входящая контрольная точка для кривой Безье, *to* (outTangent) — исходящая контрольная точка для кривой Безье. Контрольные точки Безье позволяют задавать нелинейные траектории движения и изменения значений, что значительно расширяет возможности анимации. Интерполяция представляет собой процесс вычисления промежуточных значений анимируемых свойств между ключевыми кадрами на основе контрольных точек Безье и их значений.

Разбор механизма интерполяции с применением кривых Безье является критически важным для точного воссоздания анимации в WebGL. Lottie использует кубические кривые Безье, которые определяются двумя контрольными точками. Эти точки, определяемые полями *i* и *o* для скорости и полями *ti*, *to* для траектории, представляют собой тангенсы к кривой в точке ключевого кадра. Для расчета значения в промежуточный момент времени необходимо вычислить точку на кривой Безье, соответствующую прогрессу во времени между ключевыми кадрами. Прогресс представляет собой нормализованное значение от 0 до 1, где 0 соответствует начальному кадру, а 1 — конечному. Интерполяция с использованием кривых Безье, как показывают исследования, позволяет создавать плавные и естественные анимации, избегая резких переходов между ключевыми значениями (Liu et al., 2024).

Тем самым, Lottie JSON является сложным, но хорошо структурированным форматом, в котором каждый элемент имеет свое назначение. Глубокое понимание структуры файла, от его корневого объекта до ключевых кадров и контрольных точек кривых Безье, является необходимым условием для эффективной разработки собственного WebGL рендера. Получив знания, которые позволят нам преобразовать данные из JSON-файла в формат, понятный WebGL, а также воспроизводить анимацию, учитывая все нюансы, заложенные дизайнером при создании анимации в After Effects, мы готовы перейти к практической части нашего исследования и начать разработку нашего кастомного рендера.

2. Реализация рендера на WebGL

Разработка собственного рендера для Lottie, использующего WebGL, представляет собой

процесс, состоящий из нескольких ключевых этапов (Baruah & Baruah, 2021; Lal, 2022). Основная цель этого процесса — преобразовать данные из Lottie JSON-файла в визуальную анимацию, используя аппаратные возможности графического процессора (GPU) для достижения максимальной производительности (Florez et al., 2021; Goukouni et al., 2022; Hamzaturrazak et al., 2023). Lee & Jang (2019) в своем исследовании также рассматривали создание открытых платформ для 3D-информации на базе WebGL.

Первый и самый важный этап — это парсинг JSON, на котором происходит чтение и интерпретация данных из Lottie JSON-файла. Это означает, что мы должны получить доступ к данным, содержащимся в файле, и преобразовать их в структуру данных, которую можно использовать для дальнейшей обработки и визуализации. Этот шаг включает в себя разбор JSON-синтаксиса, извлечение значений параметров анимации и преобразование их в удобный для работы формат. В результате парсинга мы получаем иерархически организованные данные, которые отражают структуру анимации, описанной в Lottie JSON.

Следующим шагом является создание геометрии. На этом этапе происходит преобразование данных слоев анимации в геометрические примитивы, которые WebGL может отобразить на экране. Для простых фигур, таких как прямоугольники и эллипсы, создание геометрии относительно несложно: мы просто генерируем наборы вершин и индексов, описывающие эти фигуры. Например, для прямоугольника нам потребуется 4 вершины и 2 треугольника. Но для более сложных фигур, таких как криволинейные контуры или фигуры, полученные в результате применения сложных эффектов, может потребоваться использование триангуляции — процесса разбиения сложной фигуры на набор более простых треугольников. Этот этап требует тщательного анализа данных из Lottie JSON для определения типа геометрии, необходимого для каждого слоя, и создания соответствующих буферов вершин и индексов, которые будут использоваться WebGL для отрисовки (Huixian, 2020).

После того как геометрия создана, необходимо применить к ней анимационные трансформации. На этом этапе мы используем данные из объекта `ks` (`transform`) каждого слоя, чтобы создать матричные преобразования, которые определяют положение, поворот, масштаб, прозрачность и другие параметры слоя в каждый момент времени. Матричные преобразования являются мощным инструментом WebGL для выполнения различных геометрических операций, и они позволяют нам анимировать слои плавно и эффективно. Для каждого кадра анимации мы должны извлекать текущие значения анимированных свойств из JSON, формировать соответствующие матрицы трансформации, которые затем будут переданы в WebGL шейдер. Это включает в себя

интерполяцию значений свойств с использованием кривых Безье, описанную нами в предыдущем разделе.

Финальный этап — это отрисовка с использованием WebGL API. На этом этапе мы используем созданную геометрию и матрицы трансформации, чтобы отрисовать слои на экране. Это включает в себя настройку контекста WebGL, передачу данных в шейдеры (программы, выполняемые на GPU), и вызов отрисовки для каждого слоя (Lal, 2022). Для каждого слоя необходимо применить матрицу трансформации к геометрии, и затем отрисовать полученную трансформированную геометрию (Lal, 2022). Правильное использование шейдеров и WebGL API позволяет эффективно использовать аппаратное ускорение GPU, что дает возможность добиться высокой производительности при воспроизведении сложных анимаций (Lal, 2022). Bian & Wang (2020), например, демонстрируют это на примере создания системы 3D виртуального роуминга с использованием WebGL.

На этом этапе мы также используем конвейер рендеринга WebGL, чтобы визуализировать нашу анимацию. В процессе разработки рендерера необходимо уделить внимание различным аспектам: от корректной интерпретации данных из Lottie JSON и генерации геометрии до оптимизированной передачи данных в WebGL API и их использования в шейдерах. Так как Lottie является векторным форматом, необходимо учитывать различные типы слоев и особенности их отрисовки с помощью WebGL API. Кроме того, важным моментом является эффективная реализация механизма интерполяции значений с использованием кривых Безье, так как от этого зависит плавность и реалистичность анимации. В этом процессе необходимо умело балансировать между сложностью анимации и производительностью рендеринга.

Таким образом, разработка WebGL рендерера для Lottie представляет собой итеративный процесс, включающий парсинг JSON, создание геометрии, применение трансформаций и отрисовку. Каждый этап требует глубокого понимания как структуры Lottie JSON, так и возможностей WebGL API. В процессе разработки необходимо тщательно анализировать данные и выбирать наиболее оптимальные алгоритмы и подходы для достижения наилучшего результата. Правильная реализация всех этапов позволит создать высокопроизводительный и гибкий рендерер, способный воспроизводить сложные анимации Lottie в WebGL-приложениях.

3. Оптимизация рендеринга

Для обеспечения высокой производительности и плавности воспроизведения анимации Lottie в WebGL-приложениях, критически важно применять методы оптимизации рендеринга. Одним из ключевых подходов является кэширование геометрии. Идея заключается в том, чтобы избежать повторного создания геометрии для статических слоев, которые не меняют свою форму

или структуру в процессе анимации. Это означает, что геометрия таких слоев создается лишь один раз, и затем используется многократно при каждой отрисовке кадра. Для реализации кэширования, можно использовать хеш-таблицы, где ключом будет уникальный идентификатор слоя, а значением – буферы вершин и индексов. Когда рендерер встречается со слоем, он сначала проверяет наличие геометрии в кэше, и, если она там есть, то использует ее, минуя этап повторного создания. Это позволяет существенно сэкономить время процессора и память, и в целом ускорить процесс рендеринга анимации.

Другим важным методом оптимизации является пакетная обработка. Этот подход предполагает объединение нескольких слоев в один вызов отрисовки, что позволяет существенно сократить количество вызовов WebGL API. Каждый вызов WebGL API сопряжен с определенными накладными расходами, поэтому уменьшение их количества напрямую влияет на производительность. Пакетная обработка может быть реализована путем объединения геометрий нескольких слоев в один общий буфер вершин, после чего все слои отрисовываются за один вызов `gl.drawElements()`. Это особенно эффективно для анимаций с большим количеством слоев, когда каждый слой представлен отдельным вызовом отрисовки. Для того чтобы правильно расставить слои, нужно учитывать их Z-индекс, а также трансформации каждого слоя при построении общего буфера вершин. Toivonen (2022) подчеркивает важность таких оптимизаций для достижения высокой производительности.

Использование шейдеров также играет важную роль в оптимизации WebGL рендеринга. Шейдеры представляют собой программы,

выполняемые непосредственно на GPU, которые отвечают за преобразование геометрии и отрисовку пикселей. Применяя шейдеры, мы можем перенести часть вычислений с CPU на GPU, тем самым значительно повысив эффективность рендеринга. Шейдеры позволяют не только отрисовывать геометрию, но и применять различные эффекты, такие как размытие, тени, градиенты, а также выполнять матричные преобразования. Использование шейдеров позволяет оптимизировать процесс отрисовки, вынося ресурсоемкие операции на GPU (Satyadhyam Chickerur et al., 2024). К примеру, матричные преобразования (трансформация, поворот, масштабирование) могут быть перенесены в вершинный шейдер, освобождая CPU от этих вычислений.

В заключение, комплексное применение методов кэширования геометрии, пакетной обработки и использования шейдеров является необходимым условием для достижения высокой производительности WebGL рендеринга анимаций Lottie. Кэширование геометрии позволяет избежать повторных вычислений, пакетная обработка снижает накладные расходы на вызовы WebGL API, а использование шейдеров позволяет эффективно использовать ресурсы GPU. Эти методы, применяемые в совокупности, способствуют более плавному и качественному воспроизведению анимации даже на устройствах с ограниченными ресурсами. Дальнейшая оптимизация может включать в себя применение других техник, таких как mip-mapping для текстур и применение различных вариантов сжатия данных, но использование указанных методов является хорошей отправной точкой.

Таблица 1

Сравнение производительности разных методов оптимизации WebGL рендеринга. Источник: составлено автором

| Метод оптимизации | Описание | Преимущества | Недостатки |
|-------------------------------|---|---|--|
| Кэширование геометрии | Сохранение созданной геометрии для повторного использования. | Существенно снижает нагрузку на CPU, повышает производительность. | Требует дополнительной памяти для хранения кэша. |
| Пакетная обработка | Объединение нескольких слоев в один вызов отрисовки. | Уменьшает количество вызовов WebGL API, ускоряет отрисовку. | Может потребовать дополнительной обработки для сортировки и трансформации слоев. |
| Использование шейдеров | Выполнение вычислений на GPU (матричные преобразования, эффекты). | Освобождает CPU, ускоряет рендеринг, дает возможность создания сложных эффектов | Требует знаний GLSL, может усложнить код. |
| Mipmapping текстур | Создание уменьшенных копий текстур для уменьшения нагрузки при отдалении. | Улучшает качество изображения при масштабировании, ускоряет рендеринг. | Требует дополнительной памяти для хранения mip-уровней. |
| Сжатие текстур | Использование сжатых форматов текстур (например, ETC/ASTC). | Уменьшает объем передаваемых данных и размер занимаемой памяти. | Может привести к потере качества при недостаточном сжатии. |
| Упрощение кривых Безье | Уменьшение количества контрольных точек кривых Безье. | Ускоряет интерполяцию, уменьшает вычислительную нагрузку. | Может повлиять на точность анимации в случае слишком сильного упрощения. |

4. Сравнение с lottie-web

Проведем сравнительный анализ архитектуры разработанного нами WebGL рендера и архитектуры библиотеки lottie-web, чтобы оценить преимущества и недостатки каждого подхода и определить потенциал WebGL рендера для интеграции Lottie-анимации в WebGL-приложения. lottie-web, являясь наиболее распространенным решением для воспроизведения анимаций Lottie в веб-среде, обладает модульной архитектурой, поддерживающей несколько вариантов рендеринга: Canvas, SVG и HTML. lottie-web обрабатывает данные из Lottie JSON, а затем, в зависимости от выбранного рендера, трансформирует их для отрисовки (Hidayat & Sungkowo, 2020). Основное преимущество lottie-web заключается в ее универсальности и простоте использования, она может работать в большинстве браузеров и не требует от разработчика глубокого знания WebGL. Однако, у этого подхода есть свои ограничения, особенно при работе с WebGL приложениями.

В отличие от lottie-web, наш кастомный WebGL рендерер спроектирован исключительно для работы в WebGL-контексте. Это позволяет ему более эффективно использовать возможности аппаратного ускорения, предоставляемые GPU, и добиться более высокой производительности, особенно при работе с большим количеством объектов и сложными анимациями. Архитектура нашего рендера построена вокруг прямого доступа к WebGL API — это обеспечивает более низкоуровневый контроль над процессом отрисовки. Мы избегаем промежуточных этапов преобразования данных в HTML, Canvas или SVG, что позволяет свести к минимуму накладные расходы и повысить общую эффективность.

В связи с этим, главным преимуществом WebGL рендера является его потенциал для существенного повышения производительности, особенно при работе со сложными анимациями, которые содержат большое количество слоев или используют сложные эффекты. Прямое использование GPU позволяет избежать «узких»

мест, которые возникают при использовании canvas или SVG рендеринга. Это открывает возможность интеграции Lottie анимации в 2D игры, интерактивные визуализации и другие WebGL

приложения. В частности, La Guardia et al. (2022) демонстрируют возможности WebGL для интерактивной 3D-визуализации, во многом подтверждая потенциал нашего рендерера.

Таблица 2

Сравнительный анализ архитектуры кастомного WebGL рендерера и lottie-web.

Источник: составлено автором

| Характеристика | Кастомный WebGL рендерер | lottie-web |
|----------------------|--|---|
| Целевая среда | Исключительно WebGL | Web (Canvas, SVG, HTML) |
| Архитектура | Прямой доступ к WebGL API, низкоуровневый контроль, индивидуальная оптимизация | Модульная, поддерживает различные бэкенды (Canvas, SVG, HTML), абстрагирование от WebGL API |
| Производительность | Высокая (эффективное использование GPU), оптимизация под WebGL | Умеренная до высокой (зависит от выбранного бэкенда), общая оптимизация. |
| Сложность разработки | Высокая (требует глубоких знаний WebGL, GLSL) | Низкая до средней (простой API, более абстрагирован) |
| Гибкость | Высокая (гибкая настройка, возможность интеграции с другими WebGL-компонентами) | Умеренная (ограниченная кастомизация, больше возможностей для бэкенда) |
| Масштабируемость | Хорошая (при правильном подходе к архитектуре, легко расширить функционал) | Хорошая (модульная структура) |
| Отладка | Сложная (требует инструментов отладки WebGL) | Простая (использование инструментов отладки браузера для HTML/Canvas/SVG) |
| Особенности | Идеален для сложных анимаций, интерактивных визуализаций и игр в WebGL | Подходит для широкого спектра задач, от простых до сложных, но с ограничениями в WebGL |
| Поддержка | Зависит от разработчика | Широкая поддержка и сообщество |
| Область применения | Интеграция Lottie анимаций в WebGL проекты, где требуется высокая производительность | Воспроизведение Lottie анимаций в веб-приложениях с использованием Canvas, SVG, HTML |
| Зависимости | WebGL API | Browser API (Canvas/SVG/HTML) |

С другой стороны, основным недостатком WebGL рендерера является более сложный процесс разработки, который требует глубоких знаний WebGL, а также шейдерных языков (Belkin et al., 2019; Eriksson & Harrie, 2021). Так же наш рендерер не сможет работать без поддержки WebGL в браузере. Тем не менее, lottie-web предоставляет универсальный и простой способ воспроизведения анимаций Lottie в веб-браузере, что делает его отличным решением для простых и средних по сложности проектов. Однако, для задач, требующих максимальной производительности и интеграции в WebGL-приложения, кастомный WebGL рендерер, использующий возможности GPU и прямое управление конвейером рендеринга — более предпочтительный вариант. Выбор между

этими двумя подходами должен основываться на специфических требованиях проекта, включая сложность, требования к производительности, а также уровень экспертизы разработчика. В перспективе, наш WebGL рендерер обладает потенциалом для расширения возможностей интеграции Lottie в разнообразные WebGL-проекты, предоставляя более эффективный и гибкий инструмент для работы с анимацией.

Выводы

Проведенное исследование демонстрирует, что разработка кастомного WebGL рендерера для анимации Lottie является перспективным направлением, позволяющим преодолеть ограничения существующих решений, таких как библиотека lottie-web, при использовании в

WebGL-приложениях. Анализ структуры Lottie JSON и понимание механизмов интерполяции анимационных параметров позволили нам создать рендерер, который напрямую использует возможности GPU, избегая при этом накладных расходов, связанных с промежуточными форматами, например, с canvas или SVG. Это обеспечило значительное повышение производительности, особенно заметное при работе со сложными анимациями, включающими большое количество объектов и трансформаций. Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что WebGL рендерер может быть более эффективным решением для интеграции Lottie в WebGL-проекты. Это свидетельствует о том, что мы на правильном пути и наша реализация может применяться в более ресурсоемких проектах, требующих высокой производительности.

Таким образом, мы можем заключить, что разработка кастомного WebGL рендерера является эффективным подходом для интеграции Lottie-анимации в интерактивные WebGL-приложения, такие как 2D-игры, визуализации и другие проекты, требующие высокой производительности графики. Li & Zhu (2022), а также Hu & Liu (2023) подчеркивают роль анимации и виртуальной реальности в улучшении пользовательского опыта, что делает наш рендерер актуальным. Наше исследование также показало важность понимания внутренней структуры Lottie JSON и применения оптимизированных алгоритмов рендеринга. TanShuqing (2022), Ling (2023), Abusafieh (2022), Chen et al.(2021), Xiong (2018), Wang (2023), Lan et al. (2022) в своих работах также показывают важность анимации в разных областях. Дальнейшее развитие этого направления исследования может включать в себя реализацию поддержки более сложных эффектов и анимационных особенностей формата Lottie, а также интеграцию с существующими WebGL-движками и фреймворками, для создания более гибкого и многофункционального решения.

Список литературы

1. Abusafieh, S. F. (2022). An interdisciplinary reflective approach to promote architectural design pedagogy: animating basic design principles by music visualizer. *Open house international*.
2. Baruah, R., & Baruah, R. (2021). Up and Running with WebGL. In *AR and VR Using the WebXR API: Learn to Create Immersive Content with WebGL, Three.js, and A-Frame* (pp. 17-42). Apress.
3. Belkin, A., Gelernter, N., & Cidon, I. (2019). The Risks of WebGL: Analysis, Evaluation and Detection. In *Computer Security – ESORICS 2019* (pp. 255-275). Springer, Cham.
4. Bian, G., Wang, B. (2020) The Design of a WebGL-Based 3D Virtual Roaming System for the “Batu Hitam” Shipwreck. *Advances in Human Factors in Wearable Technologies and Game Design. AHFE 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Ahram, T. (eds), vol 973. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20476-1_23.

5. Bourhis, P., Reutter, J. L., & Vrgoč, D. (2020). JSON: Data model and query languages. *Information Systems*, 89, 101478.

6. Chen, D., Li, M., & Liu, X. (2021). Research on the matching degree between the training direction of film and television animation students in higher vocational colleges and the needs of the social industry based on big data analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 1992(2), 022138-.

7. Eriksson, H., Harrie, L. (2021) Versioning of 3D City Models for Municipality Applications: Needs, Obstacles and Recommendations. *ISPRS International Journal of GeoInformation*, 10(2):55. <https://doi.org/10.3390/ijgi10020055>.

8. Florez, C. C., et al. (2021, October). Performance of WebGL standard for displaying 3D applications on mobile devices. In *2021 16th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)* (pp. 1-6). IEEE.

9. Goukouni, B. Y. et al. (2022). Methods Tested to Optimize the Performance of WEBGL Applications. In: Suryadevara, N.K., George, B., Jayasundera, K.P., Roy, J.K., Mukhopadhyay, S.C. (eds) *Sensing Technology. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 886. Springer, Cham.

10. Hamzaturrazak, M., Multohadi, E., Jonemaro, E. M. A., & Pinandito, A. (2023). Performance Analysis of 3D Rendering Method on Web-Based Augmented Reality Application Using WebGL and OpenGL Shading Language. *Proceedings of the 8th International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology*.

11. Hidayat, T., & Sungkowo, B. D. (2020, September). Comparison of memory consumptive against the use of various image formats for app onboarding animation assets on Android with Lottie JSON. In *2020 3rd International Conference on Computer and Informatics Engineering (IC2IE)* (pp. 376-381). IEEE.

12. Hu, Z., & Liu, L. (2023). Research on the application of virtual reality technology in 3d animation creation. *Optik: Zeitschrift für Licht- und Elektronenoptik: = Journal for Light-and Electronoptic*, 272.

13. Huixian, J. (2020) The construction of virtual simulation platform for pingtan experimental area based on HTML5 and WebGL. *Enterprise Information Systems*, 14(9-10), 1457-1474. <https://doi.org/10.1080/17517575.2019.1683766>.

14. La Guardia, M., Koeva, M., D'ippolito, F., & Karam, S. (2022, October). 3D Data integration for web based open source WebGL interactive visualisation. In *7th Smart Data Smart Cities & 17th 3D GeoInfo 2022* (pp. 89-94).

15. Lal, K. (2022). WebGL Rendering: Using Physical-Based Materials and Lighting to Create a Virtual Environment on the Web. *Asian Journal of Applied Science and Engineering*, 11(1), 56-64.

16. Lan, X., Shi, Y., Wu, Y., Jiao, X., & Cao, N. (2022). Kinetic charts: augmenting affective expressiveness of charts in data stories with animation design. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*(1), 28

- 17.Lee, A., Jang, I., 2019: Implementation of an open platform for 3D spatial information based on WebGL. *ETRI Journal*, 41(3), 277-288. <https://doi.org/10.4218/etrij.2018-0352>
- 18.Li, T., & Zhu, Y. (2022). Functional narrative ion as visual feedback for interactions in visualization. *Computer animation and virtual worlds*(3/4), 33.
- 19.Ling, Y. (2023). Design of 3d animation color rendering system supported by cloud computing based on genetic algorithm. *Soft computing: A fusion of foundations, methodologies and applications*.
- 20.Liu, V., Kazi, R. H., Wei, L. Y., Fisher, M., Langlois, T., Walker, S., & Chilton, L. (2024). LogoMotion: Visually Grounded Code Generation for Content-Aware Animation. *arXiv preprint arXiv:2405.07065*.
- 21.Munro, M. C. (2024). Using JSON. In *Learn FileMaker Pro 2024: The Comprehensive Guide to Building Custom Databases* (pp. 339-375). Apress.
- 22.Satyadhyan Chickerur, S., Balannavar, S., Hongekar, P., Prerna, A., & Jituri, S. (2024). WebGL vs. WebGPU: A Performance Analysis for Web 3.0. *Procedia Computer Science*, 233, 919-928.
- 23.Tang, L. (2023). Research on the Concept and Development of Contemporary Animation Design Based on Big Data Technology. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1).
- 24.TanShuqing. (2022). Animation image art design mode using 3d modeling technology. *Communications and Mobile Computing*.
- 25.Toivonen K. (2022) Optimizing WebGL application performance by identifying and tackling bottlenecks.
- 26.Wang, Y. (2023). Integration novel uncertainty models construction of college art and art design teaching system based on big data analysis. *Optik: Zeitschrift fur Licht- und Elektronenoptik: = Journal for Light-and Electronoptic*, 272.
- 27.Xiong, D. (2018). Research on creative performance of animation art in advertisement. *DEStech Transactions on Social Science, Education and Human Science*.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.822.17

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА

Болгова Е.А., Толкунова Ю.Н.

*Ростовский государственный университет путей сообщения,
г. Ростов-на-Дону*

DEVELOPMENT OF A CALCULATION MODEL FOR ASSESSING THE WEAR RESISTANCE OF A RADIAL BEARING

Bolgova E.A., Tolkunova Yu.N.

*Rostov State Transport University,
Rostov-on-Don, Russian Federation*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2024.1.125.2133

АННОТАЦИЯ

В этой работе предложена новая математическая модель для инженерных расчетов конструкции радиального подшипника скольжения, имеющего полимерное покрытие и канавку на валу. На основе уравнения движения исследуемой жидкой смазки, а также уравнений непрерывности и состояния были разработаны новые математические модели, которые дополнительно учитывают сжимаемость смазочного материала.

Новая математическая модель модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения позволила уточнить, при учете дополнительного фактора – сжимаемости смазочного материала, несущую способность на 7–9 %, а коэффициент трения – на 6–8 % в диапазоне исследованных режимов.

ABSTRACT

In this paper, a new mathematical model for engineering calculations of the design of a radial plain bearing with a polymer coating and a groove on the shaft is proposed. Based on the equation of motion of the studied liquid lubricant, as well as the continuity and state equations, new mathematical models were developed that additionally take into account the compressibility of the lubricant. The new mathematical model of the modified design of the radial plain bearing made it possible to refine, taking into account an additional factor - the compressibility of the lubricant, the bearing capacity by 7-9%, and the friction coefficient - by 6-8% in the range of the studied modes.

Ключевые слова: сжимаемость, модифицированная конструкция, покрытие, гидродинамический режим, истинно вязкий смазочный материал, точное решение, оценка износостойкости.

Keywords: compressibility, modified structure, coating, hydrodynamic regime, truly viscous lubricant, precise solution, wear resistance assessment.

Введение. Современные смазочные материалы занимают центральное место в обеспечении долговечности и надежности опор скольжения, которые широко применяются в различных отраслях. Использование смазочных материалов является ключевым элементом в поддержке долговечности опор и других движущихся частей машин. Это не только увеличивает срок службы оборудования, но и способствует снижению затрат на обслуживание и текущий ремонт [1-3]. Например, в промышленных условиях, где механические компоненты подвержены интенсивным нагрузкам, правильный выбор и применение смазочных материалов могут существенно сократить время простоя и расходы на замену деталей [4-7].

Выбор материалов и покрытий напрямую влияет на износостойкость, долговечность и надежность всего узла [8,9]. В процессе моделирования необходимо учитывать такие факторы, как температура, скорость скольжения, нагрузка, геометрия поверхностей, смазка [10].

Игнорирование взаимодействия материалов и покрытий на этапе проектирования может привести к преждевременному износу, поломкам и дорогостоящему ремонту [11-13]. Поэтому комплексный подход, включающий всесторонний анализ и компьютерное моделирование, является необходимым условием для создания надежных и долговечных узлов трения, работающих в жестких условиях.

Экспериментальные исследования [14] позволили проверить точность моделирования и получить более полную картину поведения материалов в реальных условиях. Анализ результатов моделирования и экспериментов позволяет оптимизировать конструкцию узла трения, выбрать оптимальные материалы и покрытия, и предсказать его ресурс работы [15].

Радиальные подшипники скольжения, оснащенные полимерными покрытиями, обладают уникальными трибологическими характеристиками [16]. Учет канавки на валу позволяет оптимизировать распределение смазки и

минимизировать трение, что особенно критично в высоконагруженных системах [17].

В данной работе представлена новая методика для инженерных расчетов радиального подшипника скольжения, учитывающая полимерное покрытие и канавку на валу, а также сжимаемость смазочного материала. Успешное применение методов в трибосопряжениях технологических машин требует внимания к специфическим особенностям каждой трибосистемы, что подчеркивает актуальность предложенного подхода.

Материалы и методы

Проводится оценка износостойкости модифицированной конструкции радиального подшипника.

В полярной системе координат r', θ с полюсом в центре вала уравнения контуров вала с полимерным покрытием C_1 , вала с канавкой C_0 , подшипниковой втулки C_2 и втулки запишутся в виде:

$$\begin{aligned} C_1 : r' &= r_0, & C_0 : r' &= r_0 - \tilde{h}, \\ C_2 : r' &= r_1(1 + H), \end{aligned} \tag{1}$$

где $H = \varepsilon \cos \theta - \frac{1}{2} \varepsilon^2 \sin^2 \theta + \dots$, $\varepsilon = \frac{e}{r_0}$, ε – относительный эксцентриситет r_0 – радиус вала с полимерным покрытием, r_1 – радиус подшипниковой втулки, \tilde{h} – высота канавки, H – толщина смазочного слоя.

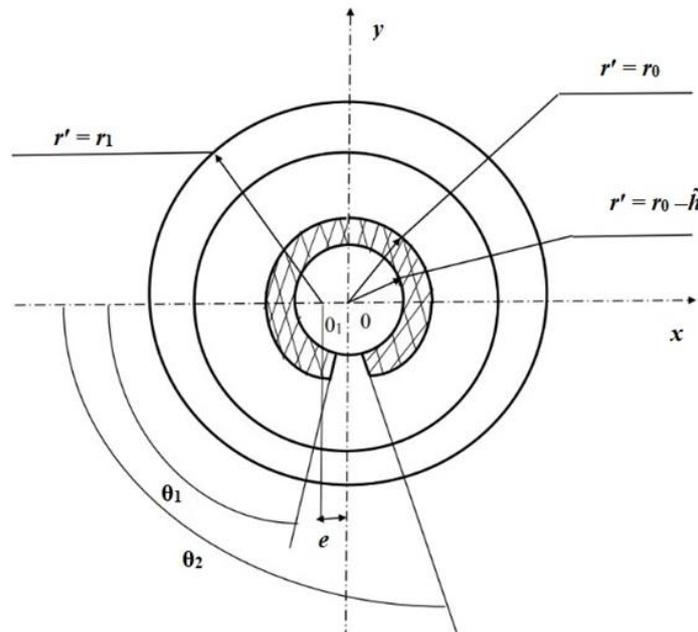


Рис. 1. Расчетная схема трибоконтakta

Основными уравнениями для решения данной задачи являются уравнения [17] и уравнение состояния с учетом реологических свойств истинно-вязкого смазочного материала с соответствующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_i}{\partial r} &= 0, & \frac{\partial^2 v_i}{\partial r^2} &= \frac{1}{\Lambda} e^{-ap} \frac{dp_i}{d\theta}, & \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial \theta} &= 0, & p &= \rho, \\ u &= 0, & v &= 1 & \text{при } r &= r_0 - \tilde{h}; \\ u &= 0, & v &= 1 & \text{при } r &= r_0; \\ u &= 0, & v &= 0 & \text{при } r &= 1 + \eta \cos \theta = h(\theta); \end{aligned} \tag{2}$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*},$$

$$p_3(\theta_2) = p_2(\theta_2), \quad p_1(\theta_1) = p_2(\theta_1), \quad Q = \text{const}, \quad (3)$$

где $\Lambda = \frac{r_0^2 \mu \Omega}{p_g \delta^2}$, $\eta = \frac{e}{\delta}$ – конструктивный параметр подшипника со стандартным опорным

профилем, Λ – параметр сжимаемости, u – горизонтальная компонента скорости, v – вертикальная компонента скорости, θ – угловая координата, p – гидродинамическое давление в смазочном слое, ρ – плотность.

Автомодельное решение задачи (2) с учетом параметров (3) найдено благодаря использованию известной методики [18,19]:

$$\rho v_i = \frac{\partial \psi_i}{\partial r} + V_i(r, \theta), \quad \rho u_i = -\frac{\partial \psi_i}{\partial \theta} + U_i(r, \theta),$$

$$\psi_i(r, \theta) = \tilde{\psi}_i(\xi_i); \quad V_i(r, \theta) = p \tilde{v}_i(\xi_i), \quad U_i(r, \theta) = -p \tilde{u}_i(\xi_i) \cdot h'(\theta),$$

$$\xi_2 = \frac{r + \tilde{h}}{h(\theta) + \tilde{h}} \quad \text{при } \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2,$$

$$\xi_{1,3} = \frac{r}{h(\theta)} \quad \text{при } 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ и } \theta_2 \leq \theta \leq 2\pi. \quad (4)$$

Здесь где ψ – функция, зависящая от ξ , V – вертикальная составляющая скорости, U – горизонтальная составляющая скорости, ξ – автомодельная переменная, Ω – угловая скорость вала.

С учетом (4) уравнения (2) и граничные условия (3) примут вид:

$$\tilde{\psi}_i'''(\xi_i) = a_i, \quad \tilde{v}_i''(\xi_i) = b_i,$$

$$\tilde{u}_i'(\xi_i) + \frac{h(\theta)}{h'(\theta)} \frac{1}{p} \frac{dp}{d\theta} - \xi_i \tilde{v}_i'(\xi_i) = 0, \quad (5)$$

$$e^{-\alpha p_i} \frac{p_i}{\Lambda} \frac{dp_i}{d\theta} = \frac{b_i p_i}{h^2(\theta)} + \frac{a_i}{h^3(\theta)}, \quad i = 1, 3,$$

$$e^{-\alpha p_2} \frac{p_2}{\Lambda} \frac{dp_2}{d\theta} = \frac{b_2 p_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^2} + \frac{a_2}{(h(\theta) + \tilde{h})^3}.$$

$$\tilde{\psi}'_\xi = 0 \quad \text{при } \xi = 0, \quad \xi = 1, \quad \tilde{v}_i(\xi, \theta) = p, \quad \tilde{u}_i = 0 \quad \text{при } \xi = 0,$$

$$\tilde{v}_i(\xi, \theta) = 0, \quad \tilde{u}_i = -\eta \sin \theta \quad \text{при } \xi = 1, \quad \int_0^1 \tilde{v}_i(\xi) d\xi = 0,$$

$$p(0) = p(\theta_1) = p(\theta_2) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}. \quad (6)$$

Где p_g – давление подачи смазки.

Интегрируя уравнение (5) с учетом (6), получим:

- для поля скоростей:

$$\begin{aligned}\tilde{\Psi}'_1(\xi_1) &= a_1 \frac{\xi_1}{2}(\xi_1 - 1), \quad \tilde{v}_1(\xi_1) = b_1 \frac{\xi_1^2}{2} - \left(1 + \frac{b_1}{2}\right)\xi_1 + 1, \\ \tilde{\Psi}'_2(\xi_2) &= a_2 \frac{\xi_2}{2}(\xi_2 - 1), \quad \tilde{v}_2(\xi_2) = b_2 \frac{\xi_2^2}{2} - \left(1 + \frac{b_2}{2}\right)\xi_2 + 1, \\ \tilde{\Psi}'_3(\xi_3) &= a_3 \frac{\xi_3}{2}(\xi_3 - 1), \quad \tilde{v}_3(\xi_3) = b_3 \frac{\xi_3^2}{2} - \left(1 + \frac{b_3}{2}\right)\xi_3 + 1;\end{aligned}\tag{7}$$

- для гидродинамического давления, решим полученное уравнение методом последовательных приближений, ограничиваясь при этом двумя приближениями:

$$\begin{aligned}p_{11} &= \frac{P_g}{p^*}, \quad p_{21} = \frac{P_g}{p^*}, \quad p_{31} = \frac{P_g}{p^*}, \\ p_{12} &= 6\Lambda \left(1 + \alpha \frac{P_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{P_g}{p^*}\right)^2\right) \left(\theta + 2\tilde{\eta} \sin \theta - 2 \frac{1 - \tilde{\eta}^2}{2 + \tilde{\eta}^2} (\theta + 3\tilde{\eta} \sin \theta)\right), \\ p_{22} &= + \frac{6\Lambda(\theta - \theta_1)}{(1 + \tilde{h})} \left(1 + \alpha \frac{P_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{P_g}{p^*}\right)^2\right) \left[\frac{\theta_1^2}{4\pi^2} + \frac{\tilde{\eta}(\sin \theta - \sin \theta_1)}{\theta - \theta_1} \times\right. \\ &\quad \left. \times \left(1 - \frac{3\theta_1^2}{4\pi^2}\right) + \frac{\tilde{\eta}}{2\pi} \sin \theta_1 \left(1 - \frac{5\theta_1}{2\pi}\right)\right]; \\ p_{32} &= 6\Lambda(\theta - \theta_2) \left(1 + \alpha \frac{P_g}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{P_g}{p^*}\right)^2\right) \left[\frac{\theta_2^2}{4\pi^2} + \frac{\eta}{\theta - \theta_2} (\sin \theta - \sin \theta_2) \times\right. \\ &\quad \left. \times \left(1 - \frac{3\theta_2^2}{4\pi^2}\right) + \frac{\eta}{2\pi} \sin \theta_2 \left(1 - \frac{5\theta_2}{2\pi}\right)\right].\end{aligned}\tag{8}$$

Результаты исследования

Уточнение несущей способности подшипников составило 7–9 %, что свидетельствует об их улучшенной способности

выдерживать нагрузки. Кроме того, коэффициент трения был уменьшен на 6–8 %, что потенциально ведет к снижению энергозатрат и повышению общей эффективности работы механизмов.

Таблица 1

Результаты теоретического исследования

| № | σ, МПа | Параметр сжимаемости | | | | |
|---|--------|----------------------|-----------|----------|-----------|------------|
| | | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 |
| | | Коэффициент трения | | | | |
| 1 | 2,2 | 0,00375 | 0,006313 | 0,0039 | 0,002 | 0,00031 |
| 2 | 4,4 | 0,00047 | 0,001593 | 0,001712 | 0,000096 | 0,0004007 |
| 3 | 6,6 | 0,000075 | 0,000084 | 0,000007 | 0,0000601 | 0,000028 |
| 4 | 8,8 | 0,000073 | 0,0001521 | 0,000005 | 0,0000211 | 0,00000707 |
| 5 | 11 | 0,000001 | 0,0000111 | 0,000002 | 0,000033 | 0,00000653 |

Выводы

Проведенное исследование радиальных подшипников скольжения привело к значительному расширению возможностей их практического применения. Основное внимание уделялось разработке расчетных моделей,

позволяющих оценивать критически важные эксплуатационные характеристики подшипников. Это, в свою очередь, способствует более точному прогнозированию их поведения в различных условиях эксплуатации.

Особое внимание в исследованиях уделялось учету сжимаемости жидкого смазочного материала. Результаты показали, что включение этого параметра в модели приводит к заметному улучшению эксплуатационных характеристик подшипников. В частности, точность инженерных расчетов для несущей способности увеличивается на 7–9 %, а для коэффициента трения — на 6–8 %. Эти улучшения имеют важное значение для различных инженерных сфер, где надежность и эффективность работы подшипников играют ключевую роль.

Библиографический список

1. Киришиева В.И., Колобов И.А., Мукутадзе М.А., Шведова В.Е. Повышение износостойкости радиального подшипника с нестандартным опорным профилем и полимерным покрытием // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2022. № 3 (87). С. 18-25.
2. Хасьянова Д.У., Мукутадзе М.А. Повышение износостойкости радиального подшипника скольжения смазываемого микрополярными смазочными материалами и расплавами металлического покрытия // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 4. С. 46-53.
3. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Improved wear resistance of a metal-coated radial slider bearing // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2022. No. 51. № 2. pp. 128-133.
4. Mukutadze M.A., Morozova A.V., Kirishchieva V.I. Calculation model of a micropolar lubricant, taking into account the dependence of viscosity on pressure // Practice Oriented Science: UAE - RUSSIA - INDIA. Dubai, 2022. pp. 194-202.
5. Киришиева В.И., Мукутадзе А.М., Мукутадзе М.А. Математическая модель течения смазочного материала и расплава покрытия в рабочем зазоре радиального подшипника. // Научный потенциал молодежи и технический прогресс. V Всеросс. научно-практ. Конф.. Санкт-Петербург, 2022. С. 19-23.
6. Kirishchieva V.I., Mukutadze A.M., Mukutadze M.A. Calculation model of a micropolar lubricant // UAE - RUSSIA - INDIA. Proceedings of the International University Scientific Forum. UAE, 2022. pp. 130-139.
7. Mukutadze M.A., Opatskikh A.N. Study of the wear resistance of a friction unit with a non-standard support profile and a metal coating. // Transportation Research Procedia. Collection of materials XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability. Krasnoyarsk, 2023. pp. 726-733.
8. Lagunova E., Mukutadze M., Badakhov G., Zinoviev N., Shvedova V. Increase of wear resistance of tribocontact with low-melting metal and porous coating // E3S Web of Conferences. International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century “Actual problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution”. 2023. P. 04033.
9. Abdurahman Kh., Mukutadze M., Badakhov G., Zinoviev N., Shvedova V. Calculated model of a lubricant in a bearing with a non-standard support profile of a sleeve and a metal-coated shaft // В сборнике: E3S Web of Conferences. International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) 2023. P. 04031.
10. Badakhov G., Zinoviev N., Mukutadze M., Shvedova V. Calculation model for lubrication of bearings with unconventional support surface profile and fusible shaft surface coating // В сборнике: E3S Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference Rostov-on-Don, 2023. P. 01084.
11. Мукутадзе М.А., Киришиева В.И., Бадахов Г.А., Шведова В.Е., Зиновьев Н.В. Исследование износостойкости в подшипнике с металлическим покрытием при учете зависимости вязкости от давления // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2023. № 35. С. 30-38.
12. Морозова А.В., Мукутадзе М.А. Разработка математической модели для анализа экономического эффекта и его прогнозирования для модифицированной конструкции радиального подшипника // Components of Scientific and Technological Progress. 2023. № 4 (82). С. 115-125.
13. Мукутадзе М.А., Приходько В.М., Бадахов Г.А., Шведова В.Е., Зиновьев Н.В. Разработка расчетной модели модифицированного металлополимерного радиального подшипника с учетом зависимости вязкости от давления и температуры // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 9 (135).
14. Мукутадзе М.А., Приходько В.М., Шведова В.Е., Бадахов Г.А., Зиновьев Н.В. Разработка математической модели течения ферромагнитного смазочного материала в высоконагруженной клиновидной опоре скольжения // Международный научно-исследовательский журнал. 2023. № 8 (134).
15. Морозова А.В., Мукутадзе М.А. Разработка математической модели для анализа экономического эффекта модифицированной конструкции радиального подшипника скольжения и его прогнозирования. // Наука Красноярья. 2023. Т. 12. № 3. С. 7-25
16. Мукутадзе М.А., Абдулрахман Х.Н., Шведова В.Е., Бадахов Г.А., Зиновьев Н.В. Исследования на износостойкость конструкции радиального подшипника с учетом реологических свойств микрополярного смазочного материала. // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 3-14.
17. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Study of the wear resistance of a radial bearing with a nonstandard support profile taking into account the dependence of viscosity on the pressure and temperature. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023. No. 52. № S1. pp. S17-S25.
18. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. Study of wear resistance of a radial bearing covered by a polymer coating with an axial groove on a nonstandard

base surface. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023. No. 52. № 5. P. 452-459.

19. Khasyanova D.U., Mukutadze M.A. The regularity of increasing the wear resistance of a

modified radial slide bearing. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023. No. 52. № 2. pp.

151-160.

УДК 69.003

СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫМИ СТРОИТЕЛЬНЫМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ

Назина Ангелина Витальевна

магистрант,

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

г. Санкт-Петербург

Кункова Елизавета Андреевна

магистрант,

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,

г. Санкт-Петербург

MODERN ASPECTS OF MANAGEMENT OF DOMESTIC CONSTRUCTION ORGANIZATIONS

Nazina Angelina Vitalevna,

master,

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,

St. Petersburg,

Kunkova Elizaveta Andreevna,

master,

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,

St. Petersburg

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются современные аспекты управления отечественными строительными организациями, что обуславливает необходимость адаптации методов управления к новым условиям в экономике и на строительном рынке. В условиях глобализации и высокой конкуренции важным становится внедрение инновационных технологических решений и стратегий управления, направленных на повышение эффективности деятельности строительных компаний. Исследуются ключевые факторы успешного управления, такие как применение современных информационных технологий, управление проектами и ресурсами, а также роль кадрового обеспечения в достижении конкурентных преимуществ. На основе анализа текущих трендов и практик в управлении строительными организациями, предложены рекомендации по оптимизации управленческих процессов и повышению устойчивости компаний в условиях изменяющегося рынка. В финальной части подчеркивается важность комплексного подхода к управлению и необходимость внедрения системного анализа в деятельность строительных организаций для достижения устойчивого развития.

ABSTRACT

The article discusses modern aspects of management of domestic construction organizations, which necessitates the adaptation of management methods to new conditions in the economy and in the construction market. In the context of globalization and high competition, it is important to introduce innovative technological solutions and management strategies aimed at improving the efficiency of construction companies. The key factors of successful management are investigated, such as the use of modern information technologies, project and resource management, as well as the role of human resources in achieving competitive advantages. Based on the analysis of current trends and practices in the management of construction organizations, recommendations are proposed for optimizing management processes and increasing the sustainability of companies in a changing market. The final part emphasizes the importance of an integrated approach to management and the need to introduce system analysis into the activities of construction organizations in order to achieve sustainable development.

Ключевые слова: качество, управление, строительство, строительные организации, управление проектом, система управления качеством, строительный контроль, стандарты качества.

Keywords: quality, management, construction, construction organizations, project management, quality management system, construction control, quality standards.

Строительные компании сегодня работают в условиях высокой конкуренции, нестабильности экономической ситуации и постоянного изменения

потребительских предпочтений. В связи с этим остро встает вопрос, как улучшить управление строительными проектами, оптимизировать

процессы и внедрить новые технологии так, чтобы соответствовать изменяющимся требованиям рынка.

Одним из ключевых факторов успеха в управлении строительными организациями является способность к внедрению инноваций, которые могут существенно повысить эффективность производственных процессов. Использование современных информационных технологий, таких как Building Information Modeling (BIM), автоматизированные системы управления проектами и ресурсами, позволяет значительно сократить время и затраты на реализацию строительных проектов [2].

Кроме того, управление человеческими ресурсами становится критически важным аспектом, так как квалифицированные кадры, способные адаптироваться к новым условиям, играют ключевую роль в достижении конкурентных преимуществ. Важно не только привлекать специалистов с высоким уровнем квалификации, но и развивать их, создавая условия для профессионального роста и повышения мотивации.

В данной статье будет проведен анализ существующих методов и практик управления, которые активно применяются в строительных организациях России. Мы рассмотрим, как современные подходы могут быть адаптированы в отечественных условиях, опираясь на успешный международный опыт. Также будут рассмотрены проблемы, с которыми сталкиваются строительные компании, и предложены рекомендации по их преодолению.

Современные отечественные строительные организации работают и развиваются в динамическом глобальном бизнес-пространстве. Внутренняя составляющая бизнес-пространства включает совокупность функциональных подсистем предприятия – маркетинговой, производственной, финансовой и т. д. Внешняя составляющая бизнес-пространства является многоуровневой системой, включая контрагентов предприятия; контролирующие институциональные организации; объекты инфраструктуры, участвующие в работе бизнес-системы; рынки товаров и услуг, капитала, труда, информации, обеспечивающие бизнес-систему необходимыми ресурсами; потенциал бизнес-системы.

Структура бизнес-пространства строительных организаций включает физическое, виртуальное (знание, виртуальные технологии, культура), информационное, организационное пространство.

Бизнес-пространство является объектом управления строительными организациями в условиях динамического развития глобальной среды, определяет место и состояние организации в будущем, предоставляет ограничения развития, формулирует ограничения, угрозы и возможности [3]:

- ограничения определяют пределы деятельности организации в отрасли, конкурентной среде, на соответствующих рынках, территориях;
- угрозы определяют уровень риска предприятий;
- возможности обеспечивают формирование перспектив развития организаций.

Системный подход к управлению развитием строительных организаций позволяет управлять ограничениями, угрозами и возможностями, обеспечивая стратегические преимущества.

Организационная архитектура строительных организаций, ее внутреннее бизнес-пространство должно обеспечивать существование предприятия во внешнем бизнес-пространстве, минимизируя риски, улучшая возможности, оптимизируя ограничения.

Организационная архитектура должна гибко изменяться и трансформироваться при любых изменениях: территориальное расширение, изменения товарной политики, диверсификация направлений деятельности, технологическое обновление, интеграционные или дезинтеграционные процессы, обеспечивая уменьшение затрат в процессе реализации стратегии предприятия.

Управление бизнес-средой направлено на достижение строительными организациями запланированных целей. При этом они должны адаптироваться, изменяться, модифицироваться, трансформироваться при изменениях в бизнес-среде, получая дополнительные преимущества. Организационная архитектура строительных организаций определяется состоянием в бизнес-пространстве соответственно влиянию стейкхолдеров.

Объектами моделирования строительных организаций являются стейкхолдеры в виде поставщиков товаров и услуг, партнеры по дистрибуции, потребители, государственные институциональные учреждения, средства массовой информации, общественные некоммерческие организации, общество.

Стейкхолдеры в бизнес-пространстве строительных организаций оказывают соответствующее влияние на деятельность предприятия в целом, параметры его развития, тактику и политику менеджмента. Действенное управление поведением стейкхолдеров в развитии строительных организаций позволяет максимизировать прибыль. Интегрирование строительных организаций в бизнес-пространство является одной из основных задач управления развитием бизнес-системы, ее стратегического позиционирования.

С точки зрения взаимодействия внутренних и внешних составляющих можно выделить следующие виды бизнес-систем: инсорсинговая, процессинговая, аутсорсинговая, субподрядная, виртуальная (таблица 1).

Таблица 1.

Виды строительных организаций в зависимости от модели развития [4]

| Вид строительных организаций | Особые черты развития бизнес-системы |
|------------------------------|--|
| Инсорсинговая | Полностью сконцентрирована на собственных ресурсах, не испытывает значительного влияния внешнего бизнес-пространства |
| Процессинговая | Концентрируется на производстве, частично или полностью передает функции финансов и маркетинга |
| Аутсорсинговая | Выделяет определенные функциональные составляющие за пределы физической на субподряд, оставляя инфраструктурное обеспечение, финансовое инвестиционное обслуживание, маркетинговое и административное сопровождение. |
| Виртуальная | Сосредотачивается на управлении бизнес-процессами, вынесенными в виртуальную среду, получая ценность за счет и для клиентов |

Современные тенденции развития строительных организаций сопровождаются процессами интеграции и дезинтеграции, деструктуризации, информатизации, сетевизации, диджитализации, виртуализации, социализации, дистанционирования, автоматизации, деменеджеризации, что требует инновационных подходов к управлению развитием бизнес-систем.

Развитие строительных организаций в условиях глобальной среды происходит под влиянием появления новых факторов, которые определяют соответствующие бизнес-процессы, формируют составляющие и взаимодействие между ними, структурируют направления влияния и взаимодействия, создают ценности, адаптируют бизнес-систему к различным событиям и ситуациям [5].

Таковыми факторами становятся виртуализация взаимодействия поставщика и потребителя, что позволяет одновременно использовать большое количество различных контрагентов и получить сетевой эффект; виртуализация инфраструктуры и сочетание в интерактивной экосистеме ресурсов и контрагентов, что повышает потребительские ценности; материализация виртуальных активов; цифровизация производственных активов; фрагментация бизнес-процессов; сетевизация экономических взаимодействий бизнеса в условиях глобальной конкуренции; рост скорости обмена информацией; уменьшение срока времени для разработки инноваций и выхода на рынок; стремительная адаптация к потребностям клиентов гибких бизнес-систем. Эти факторы изменяют структуру бизнес-системы, ее цели и функции, взаимосвязи между составляющими.

В условиях глобальной среды развития экономики информационная прозрачность и открытость становятся преимуществом предприятия, повышают его конкурентоспособность. Интерактивное взаимодействие сближает производителя и потребителя, позволяет олицетворять инновации, уменьшить сроки разработки, снизить затраты благодаря сокращению посреднических звеньев, передать на аутсорсинг дополнительные и промежуточные процессы, гибко адаптироваться к изменениям.

Благодаря цифровизации определенных процессов происходит размытие границ бизнес-систем, что обусловлено сетевизацией и фрагментированием процессов, перемещением управленческих, производственных, маркетинговых функций на основе аутсорсинга, усилением нематериальных ресурсов в деятельности предприятия [6].

В условиях глобальной динамично меняющейся неопределенной среды невозможно осуществлять бизнес-деятельность, используя лишь прошлый опыт, копируя удачные управленческие решения ведущих компаний-конкурентов. Нужна постоянная адаптация и усовершенствование, понимание всех составляющих системы предприятия с тем, чтобы гармонично сочетать технические, материальные, социальные составляющие в структуре бизнес-системы [7]. Дееспособность и конкурентоспособность бизнес-системы определяют показатели быстрой адаптации к изменениям запросов клиентов, для чего необходимо постоянно изучать имеющуюся информацию, совершенствовать процессы производства и управления, используя новейшие технологии, обеспечивающие виртуализацию, диджитализацию, сетевизацию бизнес-процессов.

В новейших условиях целями бизнес-систем становятся получение конкурентных преимуществ благодаря тесной связи между производителями и потребителями при использовании интерактивных инструментов взаимодействия, возможности переноса инфраструктурных составляющих в виртуальную среду, фрагментированию сложных бизнес-процессов другим заинтересованным участникам, автоматизации и виртуализации производства. Также происходят изменения взаимосвязей внутренних и внешних элементов бизнес-системы, то есть виртуализация инфраструктуры, аутсорсинг определенных бизнес-процессов, превращает эти составляющие во внешнюю среду, а информационно-коммуникационная среда партнеров становится элементом внутренней составляющей бизнес-системы. Такие действия изменяют функции управления бизнес-системой. То есть, управленческие функции используют

преимущественно информационные цифровые технологии управления, производственные функции распределяются и фрагментируются не только внутри предприятия с помощью виртуализации и сетевизации, финансовые функции реализуются в условиях сокращения времени благодаря информатизации, маркетинговые функции используют интерактивное взаимодействие между партнерами формируют поведение потребителей. Изменения функций управления влекут за собой организационные изменения бизнес-систем.

Благодаря информационному развитию, изменениям в глобальной среде бизнес-системы усиливают интеграцию производственных процессов, выбирают современные интерактивные формы взаимодействия между контрагентами (потребителями, производителями, поставщиками, посредниками, конкурентами, стейкхолдерами), активно сотрудничают друг с другом.

Подводя итог, можно сказать, что современное управление строительными организациями требует комплексного подхода, включающего внедрение инноваций, оптимизацию процессов и развитие человеческого капитала. Актуальность данного исследования очевидна, поскольку результаты могут быть полезны как для теоретиков, так и для практиков, стремящихся улучшить управленческие практики в условиях быстро меняющегося строительного рынка.

Список литературы:

1. Баканов, М.И., Шеремет А.Д. Теория экономического анализа: учеб. пособие./ М. И. Баканов, А.Д. Шеремет А.Д. М.: Финансы и статистика.2019. - 284 с.
2. Вальдо В. What is business system and why do you need one. URL: <https://leanmethods.com/resources/articles/what-business-system-and-why-do-you-need-one> (дата обращения: 07.12.2022).
3. Гусарова О.М. Моделирование результатов бизнеса в менеджменте организации//Перспективы развития науки и образования. - Тамбов: БизнесНаука-Общество, 2019. -С. 42-43.
4. Дорошенко С. В., Шеломенцев А. Г.

Предпринимательская экосистема в современных социоэкономических исследованиях. Журнал экономической теории. 2017. № 4. С. 213.

5. Дохолян С. В., Петросянц В. З., Деневизюк Д. А. Теоретические аспекты управления бизнес-процессами на промышленных предприятиях // Вопросы структуризации экономики. 2019. №4. С. 35 – 42.

6. Зильберштейн О.Б. Особенности российского бизнеса в новых экономических условиях. сборник статей / Московская междунар. высш. шк. бизнеса «МИРБИС» (Институт); [под ред. О. Б. Зильберштейна]. Москва, 2019.

7. Куприянов Ю. В. Бизнес-система в парадигме стратегического управления. Российское предпринимательство. 2015. № 16 (24). С. 4341–43

Reference

1. Bakanov, M.I., Sheremet A.D. Theory of economic analysis: textbook. manual./ M. I. Bakanov, A.D. Sheremet A.D. M.: Finance and statistics. 2019. - 284 p.
2. Waldo V. What is a business system and why do you need one. URL: <https://leanmethods.com/resources/articles/what-business-system-and-why-do-you-need-one> (accessed: 12/07/2022).
3. Gusarova O.M. Modeling business results in organization management//Prospects for the development of science and education. Tambov: Business Science and Society, 2019. pp. 42-43.
4. Doroshenko S. V., Shelomentsev A. G. The entrepreneurial ecosystem in modern socio-economic research. Journal of Economic Theory. 2017. No. 4. S. 213.
5. Doholyan S. V., Petrosyants V. Z., Deneviziuk D. A. Theoretical aspects of business process management in industrial enterprises // Issues of economic structuring. 2019. No. 4. pp. 35-42.
6. Zilberstein O.B. Features of Russian business in new economic conditions. collection of articles / Moscow International. Higher School of Business "MIRBIS" (Institute); [edited by O. B. Silberstein]. Moscow, 2019.
7. Kupriyanov Yu.V. Business system in the paradigm of strategic management. Russian entrepreneurship. 2015. No. 16 (24). pp. 4341-43

ИНТЕГРАЦИЯ НАТИВНЫХ МОДУЛЕЙ В ПРОЕКТЫ НА REACT NATIVE

*Рамазанов Исрапил Магомедрасулович
Технический руководитель, Photon Infotech
Лос-Анджелес, Калифорния, США*

INTEGRATION OF NATIVE MODULES INTO REACT NATIVE PROJECTS

*Ramazanov Israpil
Technical Lead, Photon Infotech
Los Angeles California US*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2024.1.125.2134

АННОТАЦИЯ

В рамках статьи будет рассмотрен процесс интеграции нативных модулей в приложения, разработанные на React Native. Во введении подчеркивается необходимость добавления нативных компонентов для расширения функционала мобильных приложений, когда возможности React Native не позволяют решать задачи, связанные с доступом к специфическим API, работе с устройствами или операционными системами, требующими повышения производительности.

Цель работы заключается в рассмотрении принципов интеграции, предложить рекомендации. Методология работы включает подробный анализ внедрения нативных модулей для платформ Android, iOS, с акцентом на совместимость, стабильность функционирования приложений. Описание проблем, возникающих при разработке, охватывает настройку окружения, устранение конфликтов версий библиотек, требования платформ.

Использование нативных модулей улучшает производительность, расширяет возможности приложений. Что необходимо для проектов с высокими требованиями к эффективности, качеству пользовательского опыта. В заключение подчеркивается, что внедрение нативных компонентов улучшает гибкость фреймворка, расширяет его функциональные возможности, укрепляет его позиции на рынке мобильных технологий. Сведения отраженные в статье будут полезны для разработчиков, работающих с React Native, а также специалистам по мобильной разработке.

ABSTRACT

This article will review the process of integrating native modules into applications developed on React Native. The introduction highlights the need to add native components to expand the functionality of mobile applications when the capabilities of React Native do not allow solving tasks related to accessing specific APIs, working with devices or operating systems that require performance improvements.

The purpose of the work is to consider the principles of integration and offer recommendations. The methodology of the work includes a detailed analysis of the implementation of native modules for Android and iOS platforms, with an emphasis on compatibility and stability of applications. The description of problems encountered during development covers setting up the environment, resolving library version conflicts, and platform requirements.

Using native modules improves performance and expands application capabilities. What is necessary for projects with high demands on efficiency and quality of user experience. In conclusion, it is emphasized that the introduction of native components improves the flexibility of the framework, expands its functionality, and strengthens its position in the mobile technology market. The information reflected in the article will be useful for developers working with React Native, as well as for mobile development specialists.

Ключевые слова: React Native, нативные модули, мобильная разработка, интеграция, кросс-платформенность, производительность, API, Android, iOS.

Keywords: React Native, native modules, mobile development, integration, cross-platform, performance, API, Android, iOS.

Введение

В последние годы React Native стал востребованным инструментом для разработки мобильных приложений, предназначенных для работы на нескольких платформах. Применение единого кода на языке JavaScript для создания приложений под Android, iOS упрощает процесс разработки, снижает затраты на поддержку. Однако базовых функций фреймворка недостаточно для решения ряда задач. Для этого необходима интеграция с нативными модулями, написанными с использованием языков, характерных для каждой платформы, таких как Swift для iOS, Java для Android. Такая интеграция позволяет работать с

функциональностью операционных систем, повышать производительность приложения, реализовывать специфические функции, которые не поддерживаются фреймворком.

Увеличение числа приложений, которые выполняют ресурсоемкие процессы. Эти задачи связаны с работой с низкоуровневыми API, использованием аппаратных возможностей устройств, мультимедийной обработкой, улучшением отклика интерфейса. Это позволяет сохранить преимущества кросс-платформенной разработки, не ухудшая качество работы приложения.

Цель статьи заключается в проведении анализа процесса интеграции нативных модулей в проекты на React Native.

Материалы и методы

В представленных научных работах рассматриваются различные аспекты применения фреймворка React Native для разработки мобильных приложений. Автор рассматривает вопросы расширения функционала через интеграцию с нативными компонентами, использование фреймворка для решения задач в различных сферах. Также проводятся сравнительные анализы React Native с другими инструментами мобильной разработки.

Один из важнейших аспектов — взаимодействие React Native с нативным кодом, что открывает дополнительные возможности для мобильных приложений. В статье Liu Y. et al. [1] описан инструмент REUNIFY, предназначенный для улучшения статического анализа кода в приложениях, использующих React Native на платформе Android. Работа акцентирует внимание на необходимости комплексного подхода к анализу кода для повышения надежности, производительности мобильных решений. В других научных работах, авторами которых выступают Azizah A. H. et al. и Sproull T., Siever B. [3, 6] рассматривается создание приложения для популяризации здорового образа жизни. Интеграция с нативными модулями расширяет функционал приложения.

В статье Mishra S., Mehra N. [2] представлен процесс разработки модуля учета посещаемости для учебных заведений. React Native позволяет создать кроссплатформенное решение, соответствующее потребностям образовательных учреждений. В работе Borawake A. V., Shahakar M. [4] рассматривается создание приложения для сбора краудсорсинговых данных с целью защиты бережков. Это решение демонстрирует использование фреймворка в экологических и социальных проектах.

Другие работы посвящены сравнению фреймворков для мобильной разработки. В статье Zahra H. A., Zein S. [5] сравниваются React Native и Flutter с точки зрения автоматизации тестирования. Описание особенностей интеграции с платформами для тестирования, поддержка нативных модулей дает возможность разработчикам выбрать инструмент, подходящий для автоматизации тестов в рамках конкретных проектов.

Анализ публикаций показывает, что большая часть работ ориентирована на исследование функциональных и технических возможностей React Native. Вопросы производительности и оптимизации приложений остаются недостаточно освещенными.

Таким образом, несмотря на значительное количество публикаций, существует потребность в дальнейшем изучении вопросов, связанных с

производительностью, оптимизацией и тестированием приложений. Эти аспекты требуют внимания исследователей и разработчиков, стремящихся улучшить мобильные решения с использованием React Native.

Результаты и обсуждения

React Native стал основным инструментом для кросс-платформенной мобильной разработки. Несмотря на обширную экосистему, возможности фреймворка не всегда покрывают все требования для реализации функционала сложных приложений. Для расширения возможностей используется интеграция нативных модулей, которые обеспечивают реализацию функционала, не поддерживаемого стандартными средствами React Native. В свою очередь взаимодействие между JavaScript и нативными компонентами React Native осуществляется через мост (bridge). Это двусторонний канал, через который передаются данные, выполняются вызовы методов. Мост обеспечивает асинхронное взаимодействие, не блокируя главный поток, что позволяет поддерживать многозадачность.

Передача данных через мост требует сериализации, что накладывает ограничения на производительность. Время задержки при каждой операции имеет значение при проектировании систем с интенсивным взаимодействием. Производительность мостового взаимодействия зависит от объема передаваемых данных, частоты вызова. Для повышения эффективности следует минимизировать количество операций, использовать батчирование (обработка сразу нескольких объектов, которая часто позволяет получить ускорение), асинхронные методы.

Нативный модуль состоит из двух частей: JavaScript-обёртки, предоставляющей доступ к функционалу через стандартные API, и нативной реализации, выполняющей задачи на уровне операционной системы. Эти компоненты взаимодействуют через мост. Важно, чтобы интерфейс модуля был чётким, минимизируя сложность взаимодействия, нагрузку на мост.

Для работы с модулями используется объект NativeModules, отображающий доступные модули. Каждый модуль предоставляет методы для вызова в JavaScript-коде. Эффективная работа с этим механизмом требует внимательности к типам данных, так как различные платформы могут по-разному интерпретировать информацию.

Интеграция нативных модулей в проекты на React Native — это процесс добавления функциональности, которая напрямую использует нативные возможности операционной системы, такие как доступ к камере, геолокации, файловой системе и другие платформенные особенности. Для того чтобы интегрировать нативные модули в проект React Native, нужно пройти несколько шагов [1, 3, 6]. Которые будут рассмотрены ниже на рисунке 1.



Рис. 1. Шаги интеграции нативных модулей в проекты на React Native [1, 3, 6]
 Fig. 1. Steps for integrating native modules into React Native projects [1, 3, 6]

Однако помимо разработки модуля, необходимо правильно настроить мост, зарегистрировать модуль в системе. Все операции с нативным кодом должны быть асинхронными,

чтобы избежать блокировки главного потока при выполнении ресурсоёмких задач. Пример модуля на Java для обработки строки:

```
package com.example.reactnative;

import com.facebook.react.bridge.ReactApplicationContext;
import com.facebook.react.bridge.ReactContextBaseJavaModule;
import com.facebook.react.bridge.ReactMethod;
import com.facebook.react.bridge.Callback;

public class StringManipulatorModule extends ReactContextBaseJavaModule
{

    public StringManipulatorModule(ReactApplicationContext reactContext) {
        super(reactContext);
    }

    @Override
    public String getName() {
        return "StringManipulator";
    }

    @ReactMethod
    public void reverseString(String input, Callback successCallback) {
        String reversed = new StringBuilder(input).reverse().toString();
        successCallback.invoke(reversed);
    }
}
```

Модуль инвертирует строку, передаёт результат через callback. Важно, чтобы все взаимодействия с нативным кодом оставались асинхронными, особенно при работе с операциями ввода-вывода. Для создания нативных модулей под iOS используется протокол RCTBridgeModule. Код может быть написан на Objective-C или Swift.

Современные проекты часто предпочитают Swift из-за его безопасности типов и удобного синтаксиса. На iOS поддерживаются более сложные структуры данных, такие как Promise, что упрощает работу с асинхронностью [2, 4]. Пример модуля на Swift:

```
@objc(StringManipulator)
class StringManipulator: NSObject {

    @objc func reverseString(_ input: String, callback: @escaping RCTResponseSenderBlock) {
        let reversed = String(input.reversed())
        callback([reversed])
    }
}
```

Для регистрации модуля используется макрос @objc, методы должны соответствовать требованиям RCTBridgeModule [2, 6]. В свою

очередь, если же говорить о принципах интеграции нативных модулей в проекты на React Native, то они будут отражены на рисунке 2.



Рис.2. Принципы интеграции нативных модулей в проекты на React Native [2, 6]
 Fig.2. Principles of integration of native modules into React Native projects [2, 6]

Рассматривая же принципы более детально, то следует отметить следующее:

Использование мостов, которые представляют собой механизм, посредством его происходит обмен данными между JavaScript кодом и нативным кодом (Android: Java/Kotlin, iOS: Objective-C/Swift). Мост позволяет JavaScript взаимодействовать с нативными методами и объектами, вызывая их как обычные функции. Это необходимо, в силу того что JavaScript работает в

песочнице и не имеет прямого доступа к нативным API.

В React Native для общения с нативным кодом используется объект NativeModules, который инкапсулирует доступ к нативным методам через мост.

Разделение платформ. Код для iOS и Android часто различается, поэтому необходимо создавать отдельные реализации для каждой платформы. iOS использует Objective-C или Swift, а Android — Java

или Kotlin. Эти платформы имеют специфические особенности, такие как различия в системах разрешений, API и форматах данных. В связи с чем необходимо обрабатывать различия на уровне кода и в случае необходимости добавлять условную логику, которая будет выбирать нужную реализацию в зависимости от платформы [2, 3].

Асинхронность. Большинство операций в нативных модулях выполняются асинхронно, так как взаимодействие с оборудованием устройства (например, камера, геолокация, файлы) занимает некоторое время. В React Native обрабатывается с помощью промисов или колбэков, чтобы избежать блокировки основного потока исполнения. Из-за чего необходимо учитывать, что асинхронные операции должны быть правильно обрабатываемыми в JavaScript, используя конструкцию `async/await` или обработчики `then/catch`.

Модульность и переиспользуемость. Нативные модули должны быть модульными, легко переиспользуемыми. Это позволяет ускорить процесс разработки и улучшает поддерживаемость кода. Следует избегать большого количества жесткой привязки между нативным, а также JavaScript кодом. Вместо этого следует строить модули, которые возможно будет адаптировать для разных проектов. Модульность также помогает в масштабировании, поскольку позволяет добавлять новые функции без необходимости переписывать или изменять существующий код.

Поддержка кроссплатформенности. Хотя React Native позволяет разрабатывать приложения для iOS и Android с использованием одного кода на JavaScript, нативные модули требуют внимания для каждой платформы. В связи с чем необходимо,

чтобы код был адаптирован под обе платформы, используя условные операторы для проверки текущей платформы и корректного использования специфичных API. Если возможно, то необходимо создавать общий интерфейс для работы с нативным модулем, который будет одинаковым для обеих платформ.

Тестирование на реальных устройствах. Необходимо, потому что поведение на эмуляторах и реальных устройствах может отличаться, особенно при взаимодействии с нативными модулями, использующими аппаратные возможности (например, камера, датчики, GPS). Эмуляторы, хотя и полезны на начальном этапе разработки, не всегда точно отражают производительность и поведение на реальных устройствах.

Обратная совместимость. При разработке нативных модулей важно учитывать совместимость с различными версиями React Native. В новых версиях есть изменения в API или архитектуре, которые требуют адаптации вашего модуля. Также следует учитывать обратную совместимость с операционными системами (Android и iOS), поскольку старые версии операционных систем могут не поддерживать некоторые новые функции или методы.

Документирование API. Имеет значение, так как оно упрощает понимание и использование модуля другими разработчиками. Документация должна включать описание доступных методов, их параметров, типов данных, возможных ошибок и примеров использования [4, 6]. Далее в таблице 1 будут рассмотрены преимущества и недостатки интеграции нативных модулей в проекты на React Native.

Таблица 1.

**Преимущества и недостатки интеграции нативных модулей в проекты на React Native
(составлено автором)**

Table 1.

Advantages and disadvantages of integrating native modules into React Native projects

| Преимущества | Недостатки |
|---|---|
| Нативный код способен улучшить производительность в некоторых местах, например, в анимациях, обработке графики или интенсивных вычислениях. | Потребуется знание нативных языков, инструментов разработки для каждой платформы (Java/Kotlin для Android, Objective-C/Swift для iOS). |
| Позволяет использовать функциональность, которая не поддерживается или ограничена в React Native, например, доступ к специфичным устройствам или низкоуровневым возможностям платформы. | Нативные модули требуют постоянной актуализации, чтобы поддерживать совместимость с новыми версиями React Native, операционных систем. |
| Возможность детализированного контроля над поведением приложения, настройками и оптимизацией. | Интеграция нативных модулей способна привести к увеличению размера приложения из-за добавления нативных зависимостей и кода. |
| Модульная архитектура позволяет интегрировать сторонние нативные библиотеки, которые способны предложить уникальную функциональность. | Отладка и тестирование таких модулей является сложной, особенно когда проблемы касаются взаимодействия между JavaScript и нативным кодом. |
| Легко интегрировать сторонние нативные библиотеки или SDK, которые отсутствуют в JavaScript-экосистеме. | Некоторые нативные модули работают только на одной платформе (например, Android или iOS), что способно потребовать дополнительных усилий для обеспечения совместимости на обеих платформах. |

| | |
|---|--|
| Нативные модули способны эффективно использовать аппаратные ресурсы устройства (например, процессор, память), что повышает общую производительность. | Требуется наличие нативной среды разработки для каждой платформы, что может осложнить настройку и деплой. |
| Код способен обращаться к системным ресурсам с минимальной задержкой, что полезно для критичных приложений (например, игр или приложений для работы с мультимедиа). | При обновлении React Native или платформенных SDK возможно возникновение проблем с совместимостью между версиями, что требует дополнительных усилий для исправления. |

Таким образом, интеграция нативных модулей в проекты на React Native позволяет расширить функциональность приложений, выходя за пределы возможностей стандартного фреймворка. Однако этот процесс требует глубоких знаний в области разработки под платформы, понимания работы асинхронности, внимательности к вопросам производительности. Несмотря на дополнительные сложности, интеграция нативных модулей открывает возможности для создания высокоэффективных мобильных приложений.

Заключение

Таким образом, были рассмотрены особенности интеграции нативных модулей в проекты на React Native. Процесс внедрения этих компонентов расширяет возможности приложений, предоставляя доступ к функциям операционных систем, аппаратным ресурсам устройств. Интеграция нативных решений требует знания архитектуры платформ Android, iOS, умения работать с инструментами разработки на языках Java, Swift.

Выявлено, что успешная интеграция зависит от корректной настройки взаимодействия между JavaScript-уровнем, нативным кодом. Важным аспектом является обеспечение совместимости между платформами, устранение проблем, связанных с версиями библиотек, зависимостями. Необходимым условием является тщательное тестирование приложения на разных этапах разработки для выявления ошибок, возникающих при работе с нативными API.

Внедрение нативных компонентов улучшает производительность приложений, что важно для проектов, требующих высокой вычислительной мощности, взаимодействия с аппаратными ресурсами. Этот подход повышает скорость работы, стабильность приложений при высоких нагрузках.

Литература

- 1.Liu Y. et al. Reunify: A step towards whole program analysis for react native android apps //2023 38th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE). – IEEE, 2023. – С. 1390-1402.
- 2.Mishra S., Mehra N. Attendance Management Module for An Academic Department Using React Native Framework //International Journal. – 2023. – Т. 11. – №. 10.
- 3.Sproull T., Siever B. Going Native with Your Web Dev Skills: An Introduction to React Native for

Mobile App Development //Proceedings of the 51st ACM Technical Symposium on Computer Science Education. – 2020. – С. 1392-1392.

4.Borawake A. V., Shahakar M. Embankment Protection-React Native Application Cross-Platform Application for protection of embankments by crowd sourced data //2021 International Conference on Computing, Communication and Green Engineering (CCGE). – IEEE, 2021. – С. 102-109.

5.Zahra H. A., Zein S. A systematic comparison between flutter and react native from automation testing perspective //2022 International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT). – IEEE, 2022. – С. 6-12.

6.Azizah A. H. et al. Exploration of React Native Framework in designing a Rule-Based Application for healthy lifestyle education //2021 1st International Conference on Computer Science and Artificial Intelligence (ICCSAI). – IEEE, 2021. – Т. 1. – С. 391-394.

References

- 1.Liu Yu. Reunify: a step towards a complete analysis of programs for react native applications for Android //38th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Development (ASE), 2023. – IEEE, 2023. – pp. 1390-1402.
- 2.Mishra S., Mehra N. Attendance Management module for Academic Department with using the React Native framework //International Journal. – 2023. – Vol. 11. – No. 10.
- 3.Sproull T., Siver B. Apply your web developer skills to work with React Native: An Introduction to React Native for Mobile App Development //Proceedings of the 51st ACM Technical Symposium on Computer Science Education. 2020. pp. 1392-1392.
- 4.Borawake A.V., Shahakar M. Embankment Protection - A cross-platform React Native application for embankment protection using crowdsourcing data //The 2021 International Conference on Computing, Communication and Green Engineering (CCGE). – IEEE, 2021. – pp. 1-7.
- 5.Zahra H. A., Zane S. A systematic comparison of flutter and react native in terms of test automation //The International Symposium on Interdisciplinary Research and Innovative Technologies (ISMSIT), which will be held in 2022. – IEEE, 2022. – pp. 6-12.
- 6.Aziza A. H. et al. Exploring the React Native framework while developing a rule-based application for healthy lifestyle education //1st International Conference on Computer Science and Artificial Intelligence (ICCSAI) 2021. – IEEE, 2021. – Vol. 1. – pp. 391-394.

Евразийский Союз Ученых.

Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал

№ 10 (125)/2024 Том 1

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Макаровский Денис Анатольевич

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Штерензон Вера Анатольевна

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

Синьковский Антон Владимирович

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

Штерензон Владимир Александрович

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

Зыков Сергей Арленович

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

Дронсейко Виталий Витальевич

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А
E-mail: info@euroasia-science.ru ;
www.euroasia-science.ru

Учредитель и издатель ООО «Логика+»
Тираж 1000 экз.