

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВУКА ПРИ КОЛЛИЗИЯХ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОГО ОКРУЖЕНИЯ

Е. В. Страшнов^а, И. П. Саблин^б

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация

^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0937-4052>, ✉ strashnov_evg@mail.ru

^б sablinivan97@gmail.com

Аннотация: в работе предлагаются методы и подходы для моделирования звука, возникающего при коллизиях виртуальных объектов в системах виртуального окружения. Предлагаемые решения основаны на воспроизведении звуковых файлов при появлении одного из событий, связанного с соударением виртуальных объектов, а также с трением скольжения и качения между ними. Подготовка звуковых файлов для каждой пары типов объектов, участвующих в коллизии, осуществляется в аудиоредакторе Audacity с открытой лицензией. Моделирование звука при соударениях и трении виртуальных объектов реализовано с применением библиотеки Miniaudio с открытым исходным кодом для воспроизведения звука в трехмерной виртуальной среде. В процессе такого моделирования вычисление уровня громкости звука осуществляется на основе информации, получаемой на стадиях определения и разрешения коллизий виртуальных объектов. Расчет громкости воспроизводимого звука при соударении виртуальных объектов реализован с применением математической модели гармонического осциллятора. Апробация предлагаемых в статье решений проводилась в программном комплексе виртуального окружения VirSim на примере взаимодействий виртуального робота с различными объектами виртуального окружения и этих объектов друг с другом.

Ключевые слова: моделирование звука, коллизия, удар, трение скольжения, трение качения, звуковой файл, Miniaudio, системы виртуального окружения.

Благодарности: публикация выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ по теме № FNEF-2024-0002 «Математическое моделирование многомасштабных динамических процессов и системы виртуального окружения».

Для цитирования: Страшнов Е. В., Саблин И. П. Моделирование звука при коллизиях объектов в системах виртуального окружения. *Успехи кибернетики*. 2026;7(2):94–101.

Поступила в редакцию: 20.03.2026.

В окончательном варианте: 29.03.2026.

SOUND SIMULATION FOR OBJECT COLLISIONS IN VIRTUAL ENVIRONMENTS

Е. В. Strashnov^а, I. P. Sablin^б

Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov
Institute”, Moscow, Russian Federation

^а ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0937-4052>, ✉ strashnov_evg@mail.ru

^б sablinivan97@gmail.com

Abstract: we proposed methods for sound simulation during collisions of virtual objects in virtual environments. The approach is based on the playback of pre-recorded audio signals triggered by collision events, as well as by sliding and rolling friction between objects. We generated sound samples for each pair of interacting object types using the Audacity audio editor. We implemented sound rendering with the open-source Miniaudio library to support 3D audio in a virtual environment. During simulation, sound volume depends on parameters obtained from collision detection and collision response. We computed sound amplitude during impacts using a harmonic oscillator model. We tested the proposed methods in the VirSim virtual environment software package using interactions between a virtual robot and various objects, as well as object-object interactions. The results show that the approach provides consistent and realistic audio feedback for collision and friction events.

Keywords: sound simulation, collision, impact, sliding friction, rolling friction, audio file, Miniaudio, virtual environment.

Acknowledgements: this is a part of the FNEF-2024-0002 Simulation of Multiscale Dynamic Processes and Virtual Environments government contract granted to the Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”.

Cite this article: Strashnov E. V., Sablin I. P. Sound Simulation for Object Collisions in Virtual Environments. *Russian Journal of Cybernetics*. 2026;7(2):94–101.

Original article submitted: 20.03.2026.

Revision submitted: 29.03.2026.

Введение

Моделирование пространственного звука значительно усиливает уровень погружения человека в виртуальный мир. Это особенно важно для систем виртуальной реальности [1, 2], которые применяются в тренажерах, обучающих симуляторах и т. д. Некоторые звуки возникают при коллизиях и контактах виртуальных объектов, когда они сталкиваются между собой (удар) или движутся друг относительно друга (трение). Например, подобные ситуации происходят в процессе тренировки оператора навыкам управления виртуальным мобильным роботом в виртуальном окружении, содержащем различные объекты.

Столкновение виртуальных объектов друг с другом приводит к кратковременному звуку, который воспроизводится только один раз в момент удара. В свою очередь, звук при трении объектов продолжается до тех пор, пока они движутся друг относительно друга. Один из подходов [3] для моделирования звука заключается в том, чтобы заранее записать набор звуковых образцов для различных уровней удара. Тогда в момент удара будет воспроизведен тот звуковой образец, который наиболее близко соответствует фактическому импульсу при ударе. Такое решение является трудоемким по причине необходимости записи большого числа звуковых файлов. Альтернативный подход состоит в соответствующем изменении громкости одного образца звукового файла в реальном времени, что широко применяется в игровых движках (например, Unreal Engine [4] и др.). Другие решения [5, 6] предполагают синтез звука во время работы самой системы виртуального окружения, тем самым усложняя обеспечение реального времени моделирования.

В данной работе предлагаются методы и подходы для моделирования звука при коллизиях виртуальных объектов, основанные на использовании одного образца звукового файла для каждого типа пар взаимодействующих объектов при ударе, а также при трении скольжения и качения. Предлагаемые в статье решения были реализованы в системе виртуального окружения VirSim [7], созданной в НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ. Для обработки звука была задействована открытая библиотека Miniaudio [8], позволяющая в реальном времени одновременно воспроизводить множество различных звуковых файлов.

Подготовка звуковых файлов

Для каждой пары типов объектов, участвующих в коллизии, необходимо найти соответствующий звуковой файл, наиболее близкий по звучанию к моделированию рассматриваемой коллизии. Поиск и скачивание таких звуковых файлов можно осуществить в сети Интернет (например, на сайтах [Freesound.org](https://www.freesound.org), [zvukogram.com](https://www.zvukogram.com) и др.).

Некоторые скачанные файлы могут потребовать корректировки (например, изменение громкости, продолжительности и др.). Для этого можно использовать аудиоредактор Audacity с открытой лицензией. В данном редакторе звуковой файл приводится к уровню громкости, максимально возможному при коллизии данной пары типов объектов. На рис. 1а показан пример исходного звукового файла в редакторе Audacity, а на рис. 1б — результат изменения громкости этого файла.

Продолжительность звуковых файлов будет отличаться в зависимости от типа коллизий. Для звуков соударений виртуальных объектов продолжительность звуковых файлов соответствует продолжительности звука при соударении соответствующих реальных объектов. Воспроизведение звуковых файлов трения (скольжения и качения) виртуальных объектов должно продолжаться до тех пор, пока при процессе трения между этими объектами не будет достигнут порог слышимости. Для этого на этапе подготовки из найденных исходных записей звуков трения выделяются фрагменты продолжительностью 1 сек. (с возможностью корректного зацикливания).

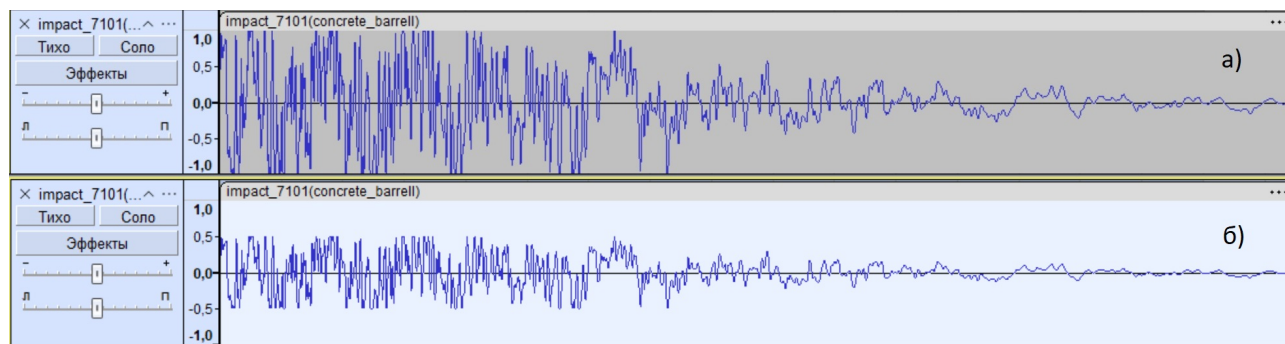


Рис. 1. Сравнение звукового файла в аудиоредакторе Audacity: а) до изменения громкости; б) после него

Эти фрагменты зацикливаются при дальнейшем моделировании, обеспечивая плавный и непрерывный звук трения между объектами.

Вычисление информации о коллизии виртуальных объектов

Моделирование коллизий виртуальных объектов в системах виртуального окружения сводится к вычислению контактной информации [9], состоящей из множества точек P_i , $i = \overline{1, N}$ контактной площадки (см. рис. 2), единичной нормали $\mathbf{n}$ к этой площадке и единичных векторов t_1 и t_2 плоскости контактной площадки, где N — число контактных точек.

Положение P виртуального источника звука вычисляется как средняя точка (геометрический центр) контактной площадки:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N}. \quad (1)$$

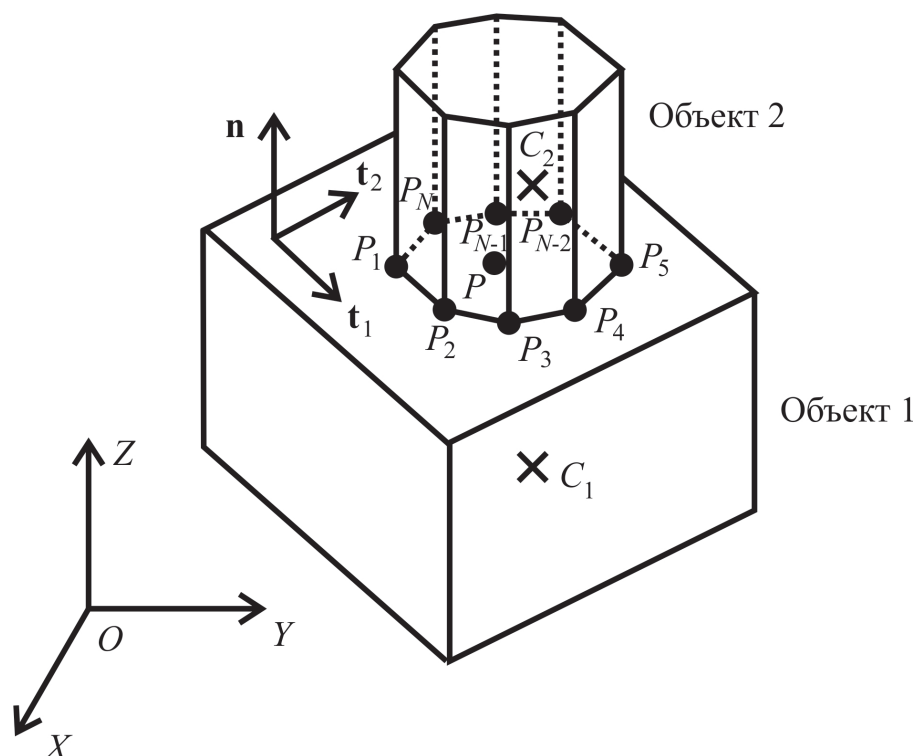


Рис. 2. Коллизия двух виртуальных объектов

Движение виртуального объекта, являющегося твердым телом, описывается с помощью линейной скорости $\mathbf{v}$ его центра масс C и угловой скорости ω . Скорость точки P в мировой системе координат $OXYZ$ вычисляется через эти скорости следующим образом:

$$\mathbf{v}^P = \mathbf{v} + \omega \times \mathbf{r}, \mathbf{r} = \overrightarrow{CP}.$$

В данном случае точка контакта P является общей точкой для рассматриваемой пары виртуальных объектов (см. рис. 2). Удар характеризуется тем, что перед столкновением объекты имеют ненулевые скорости вдоль нормали $\mathbf{n}$. Тогда модуль относительной скорости вдоль этой нормали вычисляется как

$$v_n = (v_2^P - v_1^P)n, \quad (2)$$

где $\mathbf{n}$ — нормаль к контактной плоскости, направленная от первого объекта ко второму, $v_1^P = v_1 + \omega_1 \times r_1$ и $v_2^P = v_2 + \omega_2 \times r_2$ — скорости точки P для двух объектов, $r_1 = \overrightarrow{C_1P}$, $r_2 = \overrightarrow{C_2P}$.

Приведенная масса этих объектов вычисляется по формуле:

$$m_{eff} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}, \quad (3)$$

где m_1 и m_2 — массы объектов.

Соотношения (1) — (3) формируют информацию, которая в дальнейшем необходима для моделирования звука столкновения двух виртуальных объектов. Запуск соответствующего звукового файла осуществляется, если выполнено условие $v_n > \varepsilon_{imp}$, где ε_{imp} — заданное пороговое значение для удара, ниже которого звук едва слышен.

В данной работе рассматриваются два вида трения: скольжения и качения. Согласно закону Кулона–Амонтона и модели трения качения [10] максимальные значения силы трения скольжения и момента трения качения пропорциональны силе реакции опоры:

$$F_{t, \max} = \mu F_n, M_{t, \max} = \delta F_n,$$

где μ и δ — коэффициенты трения скольжения и качения, которые зависят от материалов взаимодействующих объектов.

Фактические значения силы F_t трения скольжения и момента M_t трения качения зависят от модулей относительных скоростей движения объектов в контактной плоскости.

Модуль относительной линейной скорости v_t движения объектов вычисляется как

$$v_t = \|v_{t1}t_1 + v_{t2}t_2\|, \quad (4)$$

где $v_{t1} = (v_2^P - v_1^P)t_1$, $v_{t2} = (v_2^P - v_1^P)t_2$, t_1 и t_2 — единичные векторы в плоскости контакта виртуальных объектов.

Модуль относительной угловой скорости ω_t вычисляется аналогичным образом:

$$\omega_t = \|\omega_{t1}t_1 + \omega_{t2}t_2\|, \quad (5)$$

где $\omega_{t1} = (\omega_2 - \omega_1)t_1$, $\omega_{t2} = (\omega_2 - \omega_1)t_2$.

Соотношения (1), (4), (5) и величина силы реакции опоры F_n формируют информацию, которая необходима для моделирования источников звука при трении скольжения и качения виртуальных объектов. Воспроизведение звука продолжается до тех пор, пока выполнены условия $F_t > \varepsilon_{sli}$ и $M_t > \varepsilon_{rol}$, где ε_{sli} и ε_{rol} — пороговые значения для силы трения скольжения и момента трения качения, соответственно, ниже которых звук едва слышен.

Математическая модель расчета громкости звука при коллизиях виртуальных объектов

В качестве теоретической основы для расчета громкости при ударе виртуальных объектов предлагается модель, в которой возникновение звуковой волны описывается в виде консервативного гармонического осциллятора (см. рис. 3). Данная модель рассматривает движение груза массой m_{eff} с начальной скоростью v_n под действием пружины жесткостью k , характеризующей упругие свойства материалов сталкивающихся объектов. Динамика консервативного гармонического осциллятора описывается вторым законом Ньютона в виде дифференциального уравнения:

$$m_{eff}\ddot{x}(t) = -kx(t),$$

где $x(t)$ — величина отклонения.

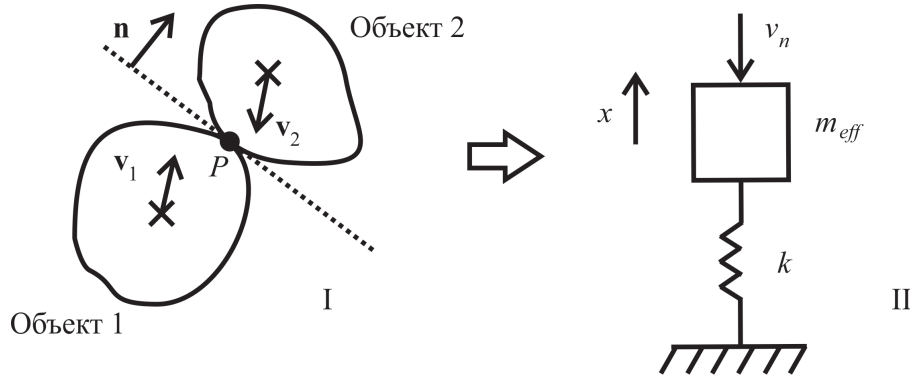


Рис. 3. Модель описания звуковой волны при ударе объектов (I) в виде гармонического осциллятора (II)

После преобразований данное уравнение можно записать в виде

$$\ddot{x}(t) + \omega_p^2 x(t) = 0, \quad (6)$$

где $\omega_p = \sqrt{\frac{k}{m_{eff}}}$ — частота гармонического осциллятора.

При ударе звуковая волна рассматривается на длине полупериода (t изменяется от 0 до $\tau = T/2$, где $T = 2\pi/\omega_p$ — период колебаний). Решение дифференциального уравнения (6) с учетом начальных условий $x(0) = 0$ и $\dot{x}(0) = -v_n$ примет вид:

$$x(t) = A \cos(\omega_p t + \pi/2) = -A \sin(\omega_p t), 0 \leq t \leq \tau, \quad (7)$$

где $A = v_n \sqrt{\frac{m_{eff}}{k}}$ — амплитуда колебаний.

Громкость звука зависит от звукового давления, которое пропорционально амплитуде звуковой волны. Из решения (7) для гармонического осциллятора получим следующее соотношение:

$$P_{imp} = b v_n \sqrt{\frac{m_{eff}}{k}},$$

где b — постоянный коэффициент пропорциональности, который зависит от скорости звука, плотности воздуха и др.

Согласно [11] громкость звука (в децибелах) при ударе виртуальных объектов в общем случае вычисляется по формуле:

$$V_{imp} = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{imp}}{P_0} \right) = 20 \log_{10} \left(b v_n \sqrt{\frac{m_{eff}}{k}} / P_0 \right),$$

где $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па — порог звукового давления.

Подготовленный в аудиоредакторе Audacity звуковой файл соударения объектов соответствует максимально возможной приведенной массе m_{eff}^0 и максимально возможному модулю относительной скорости v_n^0 . Обозначим его громкость через V_{imp}^0 . Для уменьшения этой громкости (в децибелах) при конкретном столкновении рассматривается разность:

$$\begin{aligned} \Delta V_{imp} &= V_{imp}^0 - V_{imp} = 20 \log_{10} \left(b v_n^0 \sqrt{\frac{m_{eff}^0}{k}} / P_0 \right) - 20 \log_{10} \left(b v_n \sqrt{\frac{m_{eff}}{k}} / P_0 \right) = \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{v_n^0 \sqrt{m_{eff}^0}}{v_n \sqrt{m_{eff}}} \right). \quad (8) \end{aligned}$$

Амплитуда звуковой волны при трении скольжения и качения зависит от потери энергии на трение [5], которая пропорциональна величине $\sqrt{F_n w}$, где F_n — сила реакции опоры, w — относительная скорость, вычисляемая по формулам (4) или (5). Подготовленные в аудиоредакторе

Audacity звуковые файлы трения виртуальных объектов соответствуют максимально возможной силе реакции опоры F_n^0 и максимально возможным модулям относительных скоростей v_t^0 и ω_t^0 . Тогда уменьшение громкости звука (в децибелах) при трении скольжения и качения виртуальных объектов вычисляется как

$$\Delta V_{sli} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{F_n^0 v_t^0}}{\sqrt{F_n v_t}} \right), \quad \Delta V_{rol} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{F_n^0 \omega_t^0}}{\sqrt{F_n \omega_t}} \right). \quad (9)$$

Моделирование звука в системе виртуального окружения VirSim

Моделирование звука при коллизиях виртуальных объектов проводилось в системе виртуального окружения VirSim [7], созданной в НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ. Этот программный комплекс содержит подсистему звука, которая реализована с применением библиотеки Miniaudio. Более подробно с методами и подходами реализации подсистемы звука системы виртуального окружения VirSim можно ознакомиться в работе [12].



Рис. 4. Столкновение виртуальной модели робота с бочкой

В процессе моделирования звук при ударе виртуальных объектов формируется на основе события, когда модуль относительной скорости движения объектов превышает заданное пороговое значение $\varepsilon_{imp} = 0.02$ м/с. Для этого события в подсистеме звука запускается подготовленный звуковой файл удара с уменьшенной по формуле (8) громкостью. Звуки трения скольжения и качения виртуальных объектов продолжаются до тех пор, пока сила трения скольжения и момент трения качения превышают пороговые значения $\varepsilon_{sli} = 1$ Н и $\varepsilon_{rol} = 0.001$ Н · м, соответственно. Для событий трения скольжения и качения виртуальных объектов запускается соответствующий подготовленный звуковой файл, который зацикливается и проигрывается, пока превышены эти пороговые значения, а изменение его громкости на каждом шаге моделирования вычисляется из соотношений (9). Моделирование в программном комплексе VirSim проводилось в созданной нами виртуальной сцене, которая содержит модель управляемого мобильного гусеничного робота и различные типы виртуальных объектов: бочки, коробки, паллеты и т.д. На рисунках 4 и 5 показаны примеры столкновения робота с бочкой и коробками. При столкновении робота с бочкой (см. рис. 4) возникает качение бочки, что соответствует звуку трения качения бочки по бетонному



Рис. 5. Столкновение виртуальной модели робота с коробками

полу. Во втором примере (см. рис. 5) столкновение робота с коробками приводит к их развалу и падению на бетонный пол.

Заключение

В данной работе предложены методы и подходы к моделированию звука, возникающего при ударе и трении (скольжения и качения) виртуальных объектов. Разработан подход, при котором громкость и длительность звука вычисляются на основе моделируемых физических параметров коллизии. Для моделирования звука при ударе виртуальных объектов была рассмотрена математическая модель консервативного гармонического осциллятора. Апробация предложенных решений проводилась в системе виртуального окружения VirSim и показала их адекватность поставленным задачам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tang J. Research on the Application of Sound in Virtual Reality. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2023;44:206–212. DOI: 10.54097/hset.v44i.7323.
2. Азанова В. А. Применение 3D-звука в системах виртуальной реальности. *Актуальные проблемы радио- и кинотехнологий: материалы II Международной научно-технической конференции*. 2018:89-96.
3. Turchet L., Pugliese R., Takala T. Physically Based Sound Synthesis and Control of Jumping Sounds on an Elastic Trampoline. *Proceedings of ISON 2013, 4th Interactive Sonification Workshop*. Erlangen: Fraunhofer IIS; 2013.
4. *Unreal Engine Documentation: Working with Audio*. Режим доступа: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/working-with-audio-in-unreal-engine>.
5. Van den Doel K., Kry P. G., Pai D. K. FoleyAutomatic: Physically-Based Sound Effects for Interactive Simulation and Animation. *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'01)*. New York: ACM; 2001:537–544. DOI: 10.1145/383259.383322.

6. Liu S., Manocha D. *Sound Synthesis, Propagation, and Rendering: A Survey*. 2020. arXiv:2011.05538. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2011.05538>. DOI: 10.48550/arXiv.2011.05538.
7. Михайлюк М. В., Мальцев А. В., Тимохин П. Ю., Страшнов Е. В., Крючков Б. И., Усов В. М. Система виртуального окружения VirSim для имитационно-тренажерных комплексов подготовки космонавтов. *Пилотируемые полеты в космос*. 2020;4:72-95. DOI: 10.34131/MSF.20.4.72-95.
8. *Документация Miniaudio*. Режим доступа: <https://miniaudio.io/docs/>.
9. Торгашев М. А., Страшнов Е. В. Определение коллизий аппроксимирующих цилиндров в системах виртуального окружения. *Программная инженерия*. 2021;12(7):385-392. DOI: 10.17587/prin.12.385-392.
10. Cross R. Coulomb's Law for Rolling Friction. *American Journal of Physics*. 2016;84(3):221–230. DOI: 10.1119/1.4938149.
11. Радзишевский А. Ю. *Основы аналогового и цифрового звука*. М.: Издательский дом «Вильямс»; 2006. 288 с.
12. Саблин И. П., Михайлюк М. В., Омельченко Д. В., Кононов Д. А. Моделирование звука в системах виртуального окружения. *Успехи кибернетики*. 2025;6(2):92-99.