



УДК 531.3

doi: 10.55287/22275398\_2026\_58\_121

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН РЭЛЕЯ ПРИ ЭКРАНИРОВАНИИ СВАЙНЫМ БАРЬЕРОМ

С. Г. Саиян<sup>\*/\*\*</sup>

А. А. Андрюхина<sup>\*\*</sup>

\* Научно-образовательный центр компьютерного моделирования им. А. Б. Золотова (НИУ МГСУ), г. Москва

\*\* Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва

### Аннотация

В статье представлено численное моделирование ослабления поверхностных волн Рэлея при экранировании локализованным свайным барьером в линейно-упругой среде. Моделирование выполнено в квазитрехмерной постановке в программном комплексе SIMULIA Abaqus с использованием явных методов интегрирования уравнений движения. Рассмотрены варианты с различной плотностью материала сваи при неизменных упругих характеристиках, что позволило оценить влияние контраста плотностей на характер распространения волнового поля. Анализ проведен по временным реализациям вертикальных перемещений в контрольной точке и по пространственным распределениям модуля перемещений в приповерхностной зоне. Установлено, что наличие свайного барьера приводит к снижению амплитуды колебаний в зоне за препятствием и вызывает фазовое запаздывание сигнала по сравнению с однородной средой. Показано, что тяжелая свая преимущественно работает как отражающий элемент, формируя зону интерференции перед барьером, тогда как легкая свая обеспечивает более выраженное ослабление за счет захвата, рассеяния и переизлучения энергии волны. Сделан вывод о более высокой эффективности сваи с пониженной плотностью относительно окружающей среды для задач вибро- и сейсмозащиты оснований, фундаментов и оборудования.

### Ключевые слова

Поверхностные волны Рэлея, свайный барьер, численное моделирование, экранирование волн, конечно-элементное моделирование, виброзащита, сейсмозащита, геотехника, контраст плотностей.

### Дата поступления в редакцию

23.03.2026

### Дата принятия к печати

30.03.2026

### Введение

Защита фундаментов зданий и сооружений, а также оборудования от динамических воздействий является одной из актуальных задач современной геотехники [1–4]. Существенная часть энергии техногенных и сейсмических воздействий в приповерхностной зоне переносится поверхностными волнами, прежде всего волнами Рэлея, которые распространяются вдоль свободной поверхности, несут

значительную долю волновой энергии и затухают с расстоянием медленнее объемных волн, вследствие чего способны оказывать заметное влияние на сооружения на значительном удалении от источника [5–8]. По этой причине снижение интенсивности таких волн в защищаемой зоне представляет как теоретический, так и практический интерес.

Одним из перспективных способов вибро- и сейсмозащиты является устройство локальных барьеров в грунтовой среде [9, 10]. В отличие от сплошных траншей свайные барьеры отличаются большей технологичностью и устойчивостью, а также меньшей материалоемкостью, что делает их удобным средством экранирования волнового поля. Однако эффективность подобных преград определяется не только их геометрией и расположением относительно источника возбуждения, но и контрастом физико-механических свойств материала сваи и окружающей среды [11, 12]. В частности, изменение плотности включения может существенно влиять на процессы отражения, рассеяния и поглощения энергии поверхностной волны.

Целью настоящей работы является численное исследование ослабления поверхностных волн Рэлея при экранировании свайным барьером в линейно-упругой среде. Для достижения поставленной цели выполнено моделирование распространения волнового поля в квазитрехмерной постановке и проведено сопоставление вариантов с различной плотностью материала сваи при неизменных упругих характеристиках. На основе анализа временных реализаций вертикальных перемещений и пространственных распределений модуля перемещений оценена эффективность барьера и выявлены основные механизмы формирования ослабленного волнового поля за препятствием.

#### **Постановка задачи и разработка расчетных конечно-элементных моделей**

Расчеты выполнялись в квазитрехмерной постановке в программном комплексе SIMULIA Abaqus в прямой динамической постановке с использованием явных методов интегрирования уравнений движения. Расчетная область представляет собой пластину с размерами  $22 \times 22 \times 0.22$ , размер активной зоны —  $20 \times 20$ , периферийные зоны служат для демпфирования отраженных волн. Поскольку большая часть энергии рэлеевской волны локализована вблизи свободной поверхности, подобная квазитрехмерная постановка приводит к существенному искажению волнового фронта.

Материал среды (грунта) моделировался как линейно-упругий, изотропный материал с безразмерными параметрами: модулем деформации  $E=1$ , коэффициентом Пуассона  $\nu=0.33$ , плотностью  $\rho_{sp}=1$ . Вычисленные на основе данных параметров скорости распространения волн составили: продольные волны  $c_p=1.22$ , поперечные волны  $c_s=0.61$ , что соответствует отношению  $c_p/c_s=2$ , характерному для реальных грунтовых сред. Скорость рэлеевской волны определяется из уравнения Рэлея для линейно-упругой изотропной среды и составила  $c_R=0.569$ .

Были разработаны расчетные конечно-элементные модели с характерным размером элементов 0.05, при этом использовался трехмерный конечный элемент C3D8R. На *рисунке 1* показаны геометрическая модель (а), конечно-элементная модель (б) и фрагмент конечно-элементной модели вблизи свайного барьера (в).

Возбуждение колебаний осуществляется треугольным импульсным воздействием с шириной импульса  $T=3.64$  и максимальной амплитудой 0.001, приложенным в угловой точке области (отмечено красным цветом на *рисунке 1, а*). Общее время моделирования составило 55 единиц времени. Свайный барьер моделируется одиночным круговым включением диаметром  $d=2$ , расположенным в центре расчетной области на пути распространения волны. Варьируемый параметр — плотность материала сваи относительно плотности окружающей её среды:  $\rho_1=2$  (тяжелая свая),  $\rho_2=1$  (равна плотности среды) и  $\rho_3=0.5$  (легкая свая) при неизменном модуле деформации сваи  $E=1$ . Измерение вертикальных

перемещений производилось в угловой точке активной зоны (в области, в которой необходимо уменьшить амплитуды колебаний грунта).

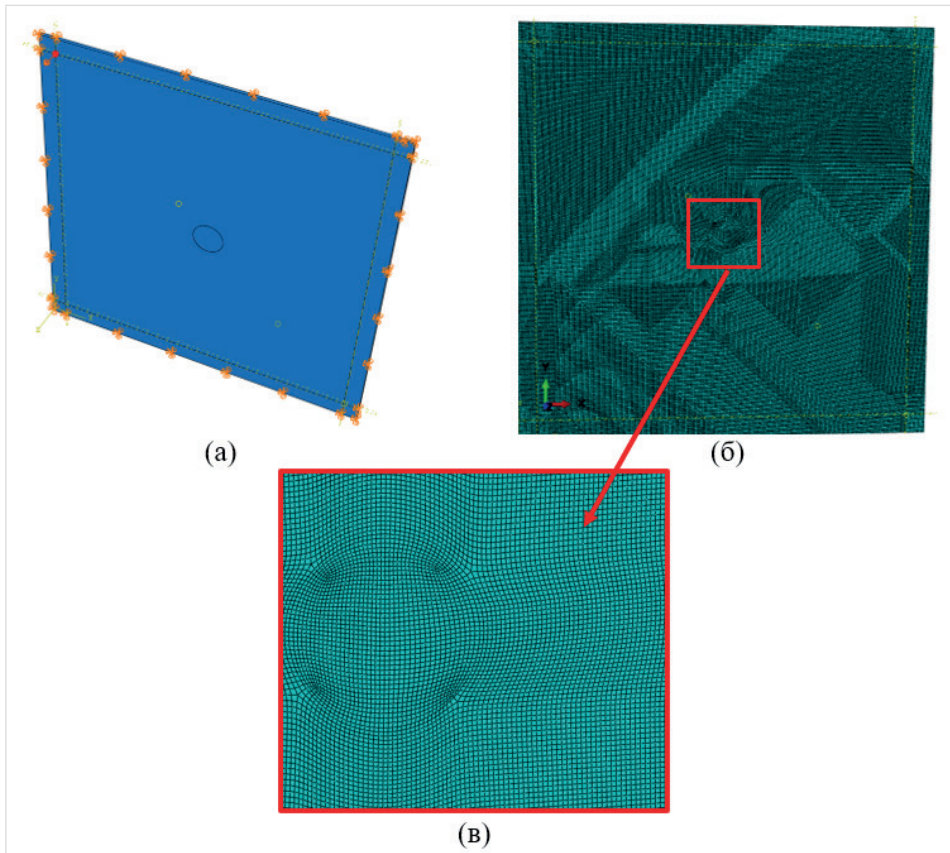


Рис. 1. Геометрическая модель (а) и конечно-элементные модели в ПК SIMULIA Abaqus (б, в)

#### Результаты численного моделирования

Для оценки эффективности экранирования проводился сравнительный анализ двух типов результатов: временных реализаций вертикальных перемещений в контрольной точке (Рис. 2) и мгновенных распределений модуля перемещений  $|U|$  в плоскости поверхностного слоя (Рис. 3, а-в).

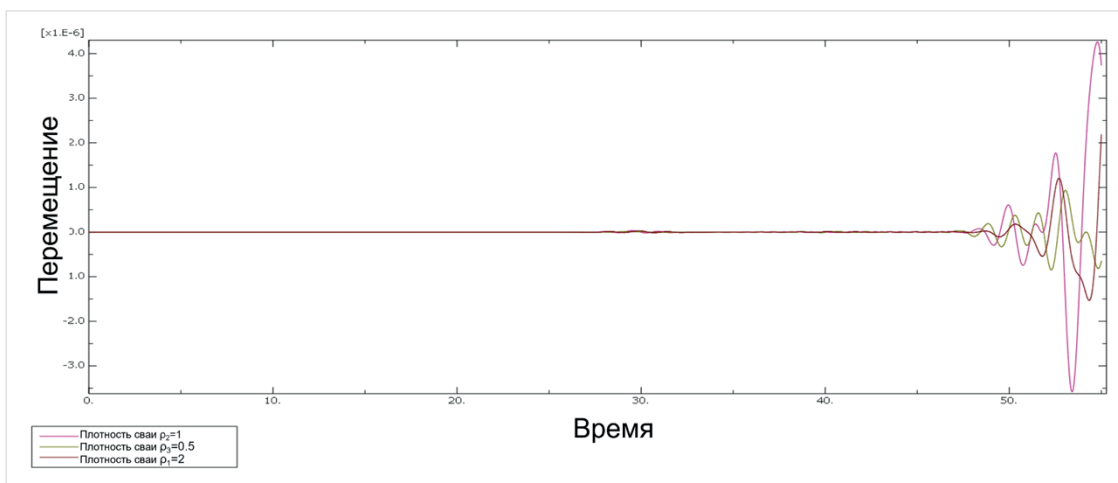
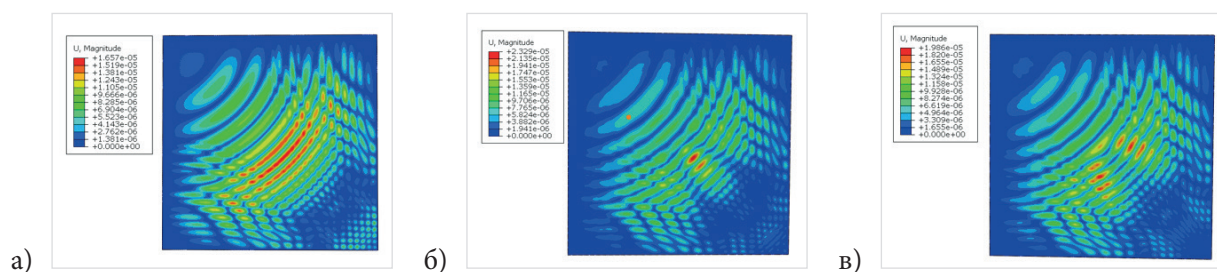


Рис. 2. Графики колебаний в контрольной точке в вертикальном направлении

Установка свайного барьера приводит к двум характерным эффектам. Первый эффект — снижение амплитуды. Наибольшее ослабление демонстрирует кривая, соответствующая легкой свае с плотностью  $\rho_3 = 0.5$ , однако тяжелая свая с плотностью  $\rho_1 = 2$  также показывает эффект понижения. Второй эффект — фазовое запаздывание сигнала: обе кривые сдвинуты вправо (во времени) относительно эталонной кривой, соответствующей расчету сваи с плотностью среды  $\rho_2 = 1$ . Данный эффект объясняется увеличением пути, проходимого волной при огибании препятствия, а также замедлением фронта при прохождении через область с характеристиками, отличными от характеристик основной среды.



**Рис. 3.** Изополя модуля перемещений в момент времени  $t=55$ : а) плотность сваи равна плотности грунта ( $\rho_2 = 1$ ); б) с тяжелой сваем ( $\rho_1 = 2$ ); в) с легкой сваем ( $\rho_3 = 0.5$ )

В первом случае, в однородной среде (**Рис.3, а**) наблюдается волновой фронт цилиндрической формы, максимальная амплитуда составляет  $1.699 \cdot 10^{-5}$ . Энергия равномерно убывает по мере удаления от источника, отсутствуют локальные зоны с резким возрастанием амплитуды.

Во втором случае (**Рис 3, б**) со сваем плотностью  $\rho_1 = 2$  наблюдается глобальный максимум  $2.522 \cdot 10^{-5}$ , что на 48% превышает значение эталонного расчета. Этот рост обусловлен формированием перед барьером зоны интерференции падающей и отраженной волны. Однако в зоне контрольной точки за барьером наблюдается уменьшение амплитуды, что также было отражено на графике вертикальных перемещений (**Рис. 3**).

В третьем случае (**Рис. 3, в**) со сваем плотностью  $\rho_3 = 0.5$  реализуется механизм поглощения энергии. Свая работает как резонатор, обеспечивая захват энергии волны. При этом за сваем формируется наиболее глубокая акустическая тень, что объясняет минимальную амплитуду соответствующей кривой на временных реализациях.

Сопоставление временных и пространственных результатов выявляет два различных физических механизма экранирования. Тяжелая свая ( $\rho_1 = 2$ ) работает преимущественно как отражатель, создавая зону интерференции перед собой. Легкая свая ( $\rho_3 = 0.5$ ) функционирует как поглотитель энергии волны и рассеивает её. В рассмотренном диапазоне параметров легкая свая демонстрирует более высокую эффективность гашения, что подтверждается как минимальной амплитудой на графике, так и наиболее глубокой акустической тенью на изополях.

### Заключение

Проведенное численное моделирование показало, что установка локализованного свайного барьера на пути распространения поверхностных волн Рэлея приводит к уменьшению амплитуды колебаний в зоне за препятствием и вызывает фазовое запаздывание сигнала по сравнению со случаем однородной среды (плотность сваи равна плотности окружающей среды). Установлено, что характер экранирования существенно зависит от контраста плотностей материала сваи и грунта.

Для тяжелой сваи с повышенной плотностью основным механизмом является отражение волны с формированием перед барьером зоны интерференции. При этом в области перед препятствием может наблюдаться локальное увеличение амплитуды по сравнению с эталонным расчетом, тогда как в защищаемой зоне за барьером фиксируется снижение перемещений. Для легкой сваи с пониженной плотностью выявлен более выраженный эффект ослабления, связанный с резонансным захватом и последующим переизлучением волновой энергии, вследствие чего за барьером формируется наиболее глубокая акустическая тень.

Таким образом, в пределах рассмотренной модели наиболее эффективным вариантом экранирования поверхностных волн Рэлея является свая с пониженной плотностью относительно окружающей её среды. Полученные результаты подтверждают перспективность применения свайных барьеров в задачах вибро- и сейсмозащиты оснований, фундаментов и чувствительного оборудования от воздействия поверхностных волн Рэлея. Дальнейшие исследования целесообразно направить на учет демпфирования и нелинейности грунта, анализ группового расположения свай, а также на изучение влияния геометрических параметров барьера и частотного состава внешнего воздействия.

### Библиографический список

1. Пшеничкина В. А., Иванов С. Ю., Рекунов С. С., Чураков А. А. Оценка надежности системы «сооружение–многослойное основание» с учетом жесткости, мощности и конфигурации слоев // Вестник МГСУ. — 2025. — Т. 20. — №. 6. — С. 888–898. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2025.6.888-898>.
2. Курбанмагомедов А. К., Акатьев С. В., Стародубцев В. В., Дикова Е. В., Мусаев А. В. Постановка десятиэтажного здания с подвалом и основанием при ударных, взрывных и сейсмических волновых воздействиях с помощью вычислительной системы Мусаева В. К // Системные технологии. — 2025. — № 4 (57). — С. 18–27. — DOI 10.48612/dnitii/2025\_57\_18-27.
3. Пшеничкина В. А., Иванов С. Ю., Рекунов С. С., Чураков А. А. Влияние соотношения жесткостей здания и многослойного грунтового основания на сейсмический отклик системы // Вестник МГСУ. — 2025. — Т. 20. — №. 2. — С. 231–245. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2025.2.231-245>.
4. Нуждин Л. В., Михайлов В. С. Численный расчет свайного поля с учетом динамических воздействий // Construction and Geotechnics. — 2023. — Т. 14. — №. 2. — С. 22–36. doi: 10.15593/2224-9826/2023.2.02.
5. Alielahi H., Nadernia Z., Entezari M. M. A numerical study on effect of underground cavities on seismic ground response due to Rayleigh wave propagation // SN Applied Sciences. — 2023. — Vol. 5. — No. 2. — P. 64. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05283-1>.
6. Агаханов Э. К., Агаханов М. К., Труфанова Е. В. Моделирование поведения большепролетного уникального сооружения при динамическом воздействии // Системные технологии. — 2023. — №. 4 (49). — С. 17–24. doi: 10.55287/22275398\_2023\_4\_17.
7. Карабаева М. У. Распространение вибрации железнодорожного движения при расположении полотна выше поверхности окружающей местности // Механика и технология. — 2023. — Т. 4. — №. 13. — С. 58–65.
8. Chen X., Wang Y., Meng F., Xie K., Yi L., Zheng Y. Isolation effect analysis of periodic pile barriers for Rayleigh waves using complex band diagram // Computers and Geotechnics. — 2023. — Vol. 158. — P. 105370. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105370>.
9. Кузнецов С. В. Сейсмические волны и сейсмические барьеры // International Journal for Computa-

tional Civil and Structural Engineering. — 2012. — Vol. 8. — No. 1. — Pp. 87–95. DOI: 10.31857/S057232992106009X.

10. Морозов Н. Ф., Братов В. А., Кузнецов С. В. Сейсмические барьеры для защиты от поверхностных и головных волн: множественные рассеиватели и метаматериалы // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. — 2021. — №. 6. — С. 33–44.

11. Саиян С. Г. Моделирование распространения дельта-импульса через сейсмический барьер из бимодульного материала // Научный журнал строительства и архитектуры. — 2025. — № 4 (80). — С. 91–103. — DOI 10.36622/2541-7592.2025.80.4.009.

12. Саиян С. Г. Использование интегро-дифференциальных уравнений для моделирования распространения сейсмических волн через барьер с эффектом памяти // Вестник МГСУ. — 2025. — Т. 20, № 10. — С. 1495–1507. — DOI 10.22227/1997-0935.2025.10.1495-1507.

---

## NUMERICAL MODELING OF THE ATTENUATION OF RAYLEIGH SURFACE WAVES BY A PILE BARRIER

S. G. Saiyan <sup>\*/\*\*</sup>

A. A. Andryukhina <sup>\*\*</sup>

\* Scientific and Educational Center for Computer Modeling of A. B. Zolotov (NRU MGSU), Moscow

\*\* National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow

---

### Abstract

#### *Relevance*

This paper presents a numerical simulation of the attenuation of Rayleigh surface waves by a localized pile barrier in a linear elastic medium. The simulation was performed in a quasi-three-dimensional formulation using the SIMULIA Abaqus software package and explicit time integration methods for the equations of motion. Cases with different pile material densities and unchanged elastic properties were considered, which made it possible to assess the effect of density contrast on the wave field propagation pattern. The analysis was carried out using time histories of vertical displacements at a control point and spatial distributions of displacement magnitude in the near-surface zone. It was found that the presence of a pile barrier leads to a reduction in vibration amplitude in the region behind the obstacle and causes a phase delay of the signal compared with a homogeneous medium. It is shown that a heavy pile predominantly acts as a reflecting element, forming an interference zone in front of the barrier, whereas a light pile provides more pronounced attenuation due to wave energy trapping, scattering, and re-radiation. It is concluded that a pile with a lower density relative to the surrounding medium is more effective for vibration and seismic protection of soils, foundations, and equipment.

### The Keywords

*Rayleigh surface waves, pile barrier, numerical modeling, wave screening, finite element modeling, vibration protection, seismic protection, geotechnics, density contrast.*

### Date of receipt in edition

23.03.2026

### Date of acceptance for printing

30.03.2026

**Ссылка для цитирования:**

С. Г. Саиян, А. А. Андрюхина. Численное моделирование ослабления поверхностных волн Рэля при экранировании свайным барьером. — Системные технологии. — 2026. — № 1 (58). — С. 121 – 127.

