

УДК 69:057

**Л. М. Весова, А. А. Тарасов**

*Волгоградский государственный технический университет*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОГРУЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СВАЙ В СЛОЖНЫХ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЯХ**

Рассматривается влияние ударного погружения на работу железобетонных свай в сложных грунтовых условиях. Показано, как напряжения по длине ствола изменяются после удара и как на поведение материала влияет плотность бетона. Выполнен разбор технологических операций при забивке, что позволило выделить этапы, оказывающие наибольшее влияние на устойчивость процесса. На основе анализа экспериментальных данных предложена модель расчета воспринимаемой энергии удара с учетом осадки свай, высоты падения молота и сопротивления грунта. Сравнение модели с нормативным выражением позволяет точнее оценивать фактическое воздействие на сваю и подбирать режим работы молота, который снижает риск повреждений при погружении в неоднородные грунты.

**Ключевые слова:** железобетонные сваи, ударное погружение, сложные грунты, структура бетона, разуплотнение, энергия удара, осадка свай, плотность грунта, динамическое воздействие, безопасный режим, технологические операции, оптимизация, нежелательные эффекты, эффективность свайных работ.

### **Введение**

Работы по устройству свайных фундаментов в сложных грунтовых условиях требуют точного понимания того, как свая реагирует на ударное воздействие и насколько безопасны выбранные режимы забивки<sup>1</sup>.

Даже при внешне нормальном отказе возможно скрытое повреждение верхней зоны ствола, а устойчивость процесса снижается из-за неоднородности грунтов, водонасыщения или резких переходов плотности [1, 2].

На площадках со сложными грунтовыми условиями погружение нередко протекает неравномерно, что делает выбор режима ударов ключевым фактором надежности [3, 4].

Технологическая цепочка забивки включает операции, влияние которых различается по значимости. Отдельные действия способны создавать дополнительные риски:

- нарушение геометрии;
- необходимость повторных добивок;
- увеличение ударной энергии сверх безопасного уровня.

Поэтому задача оптимизации технологии предполагает не только выбор режима ударного воздействия, но и сокращение действий, повышающих вероятность нежелательных эффектов. Для этого необходима оценка фактической реакции бетона на динамическую нагрузку и определение допустимой величины ударного импульса.

---

<sup>1</sup> Дедков В. И. Изменение структуры бетона забивных железобетонных свай при ударном нагружении и разработка методов противокоррозионной защиты : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2005. 20 с.

### Основная часть

При изучении изменения структуры материала по длине сваи полученные данные авторами в работе [3] позволяют построить график зависимости относительных напряжений от расстояния от оголовка сваи для бетонов плотности В4, В6, В8 (рис. 1).

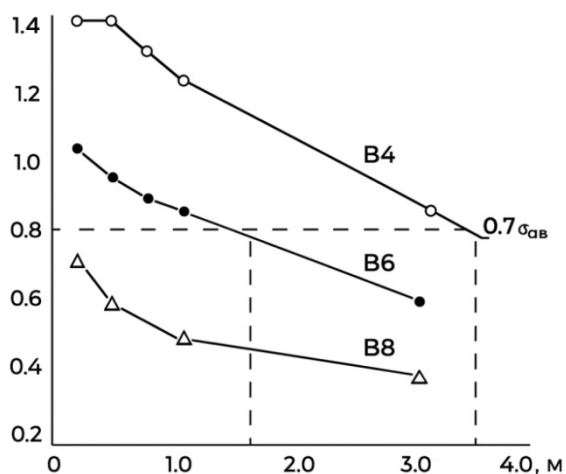


Рис. 1. Распределение относительных напряжений вдоль ствола сваи для бетонов различной плотности (подготовлено авторами на основании рассмотренных данных эксперимента)

Кривые на графике показывают, как постепенно уменьшаются напряжения вдоль ствола сваи после нанесения удара.

Самые высокие значения находятся у оголовка, затем напряжения снижаются по мере удаления вниз. Каждый бетон ведет себя по-своему.

У бетона В8 снижение происходит быстрее, что означает более эффективное погашение ударной энергии в верхних зонах. У бетона В6 спад более плавный.

У бетона В4 напряжения остаются высокими на большой длине и сохраняются почти до уровня трех или четырех метров от оголовка [1]. Выходит, что менее плотный бетон дольше удерживает воздействие и сильнее нагружается на глубине.

Различия в поведении подтверждают необходимость учитывать плотность бетона при выборе параметров забивки, поскольку слишком жесткий ударный режим может вызвать повреждение материала, особенно если бетон имеет низкую плотность.

Для уточнения данных зависимостей в табл. 1 представлены параметры физических и механических характеристик бетона, применяемых в исследовании [5, 6].

Показатели таблицы подтверждают различия в устойчивости материалов, бетон В8 обладает минимальной водопроницаемостью и наибольшей прочностью, поэтому повреждается слабее.

Бетон В4 имеет противоположные свойства и демонстрирует более широкую зону изменений структуры, что согласуется с графиком.

Таблица 1

*Параметры физических и механических характеристик бетона  
(разработано авторами на основании анализа рассматриваемых данных)*

Марка бетона	П, %	W, %	$K_{\phi}$ , см/с	$R_{сж}$ , МПа	$R_{пр}$ , МПа	$E_{пр} \cdot 10^5$ , МПа	$\mu$
B4	21,2	6,4	$5,5 \cdot 10^{-9}$	27,1	22,2	0,27	0,15
B6	15,5	4,7	$1,9 \cdot 10^{-9}$	35,3	29,5	0,30	0,16
B8	9,1	4,2	$3,8 \cdot 10^{-10}$	46,9	40,8	0,34	0,17

Динамическое поведение бетона при забивке зависит не только от величины ударного импульса, но и от исходной структуры материала, что приводит к необходимости анализа не отдельных эффектов, а комплекса факторов, который формирует технологическую картину процесса [7].

Для оценки вклада каждого элемента была построена матрица значимости операций. Ее основу составили данные о типовых технологических схемах погружения свай, описанные в публикациях [6—12], где приводятся результаты наблюдений на строительных объектах, замеры отказов, особенности погружения в плотные и неоднородные грунты, а также сводные рекомендации по организации работ.

На основании анализа этих материалов выделены операции, непосредственно влияющие на передачу ударной энергии, и операции, определяющие подготовку сваи к погружению [13]. Далее каждая операция была оценена по трем критериям, влияние на форму и направление удара, влияние на точность положения сваи перед каждым циклом и влияние на стабильность отказа.

Результаты сведены в матрицу, представленную в табл. 2.

Таблица 2

*Матрица значимости функций операций по забивке свай  
(разработано авторами на основании анализа рассматриваемых данных)*

Функция операций	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\Sigma^+$	$V_i$ , %	$R_i$
1. Разбивка свай	0	±	–	–	–	–	0	–	–	–	0,5	1,11	9
2. Раскладка свай	±	0	–	–	–	–	–	–	–	–	0,5	1,11	10
3. Переезд копра	+	+	0	+	+	±	+	±	–	+	6	13,33	4
4. Установка свай	+	+	0	0	+	+	–	0	–	+	5	11,11	5
5. Выверка свай	+	0	–	–	0	+	–	–	–	+	3	6,67	7
6. Забивка свай	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	9	20,00	1
7. Контроль отказа	0	0	+	0	0	+	0	+	–	+	4	8,89	6
8. «Отдых» свай	+	–	–	–	–	–	–	0	0	±	2	4,44	8
9. Добивка свай	+	+	0	+	+	+	+	0	0	+	8	17,78	2
10. Срубка головы	+	+	–	+	+	+	0	+	–	0	7	15,56	3
<i>Итого</i>											45	100	

Матрица подтверждает, что основное влияние оказывают операции формирования удара. Забивка и добивка свай имеют максимальные значения значимости, что соответствует данным о динамическом распределении напряжений и характере повреждений бетона [13, 14].

Наведение, установка свай и контроль отказа также занимают высокие позиции, поскольку малейшее отклонение в этих действиях приводит к смещению оси нагрузки и росту повреждений в верхней зоне ствола, что отмечалось в исследованиях [3, 14, 15].

Для уточнения влияния операций на трудоемкость и стабильность процесса выполнена дополнительная оценка проблемной значимости. Значения трудозатрат и относительной «проблемности» операций основаны на данных наблюдений, приведенных в источниках [3, 14, 15], где фиксируется фактическая продолжительность отдельных действий и частота возникающих нарушений при забивке свай.

Сформированы обобщенные показатели, отраженные в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

*Показатели трудоемкости и технологических отклонений операций  
(разработано авторами на основании анализа рассматриваемых данных)*

Этап	Операция	Трудозатраты, %	Технологическое отклонение, %	Принятое значение
1	Разбивка свайного поля	3...5	6,1	5
2	Раскладка свай	3...6	10,1	8
3	Передвижение копра	5...7	9,1	7
4	Подъем и установка свай	7...10	9,8	8
5	Выверка свай	4...7	6,1	5
6	Погружение свай	13...25	33,2	10
7	Измерение погружения	4...7	5,1	4
8	«Отдых» свай	3...6	7,3	6
9	Добивка свай	7...13	12,7	9
10	Срубка головы свай	11...20	10,0	6

Операции, формирующие удар, оказываются не только наиболее значимыми по влиянию на передачу энергии, но и наиболее трудоемкими и чувствительными к отклонениям.

Наибольшие трудозатраты и проблемная значимость приходятся на этапы погружения и добивки свай, что объясняется повышенной вариативностью отказов, необходимостью точного выдерживания осадки и риском повреждений оголовка.

Совпадение критически важных операций в табл. 2 и 3 показывает, что устойчивость забивки формируется сочетанием правильного направления удара и стабильного положения свай в момент передачи импульса.

Нарушения на данных этапах приводят к увеличению зоны напряжений в верхней части ствола, что соответствует экспериментальным результатам [3] и данным о снижении прочностных характеристик бетона при многократных ударах.

Операции, формирующие удар, оказываются наиболее сложными и чувствительными к отклонениям. Больше всего времени и ошибок приходится на погружение и добивку свай, поскольку именно в эти моменты задается фактическая осадка и направление движения элемента. Небольшие нарушения в положении свай или в силе импульса сразу увеличивают нагрузку на верхнюю часть ствола и ускоряют развитие повреждений.

Выраженные последствия подтверждаются экспериментальными наблюдениями [15], где отмечено усиление разрушений бетона при отклонении режима ударов.

Согласно табл. 7.13, приведенной в СП 24.13330.2021, энергия удара молота определяется произведением массы ударной части на ускорение свободного падения и высоту ее свободного хода с учетом коэффициента эффективности оборудования<sup>2</sup>:

$$E_0 = mgH \cdot \eta. \quad (1)$$

Формула отражает величину энергии, доступной перед передачей импульса на сваю. При погружении в сложных грунтовых условиях фактическая величина воспринимаемого импульса отличается от расчетной.

Часть энергии уходит на сжатие и боковое перераспределение грунта, на деформацию оголовка, на отклонение направления удара и потерю контакта между элементами оборудования.

На основании проведенного анализа обнаружено несоответствие между расчетной величиной энергии удара и фактически воспринятой частью импульса.

Сопоставление расчета с кривыми распределения напряжений показывает отсутствие пропорционального роста осадки при увеличении энергии удара.

Подобный характер реакции встречается и в материале [16], где фиксируется ускоренное накопление структурных повреждений при переходе через определенный уровень динамического воздействия.

При сравнении данных выявлена повторяющаяся закономерность.

Увеличение высоты падения уменьшает прирост осадки и одновременно приводит к росту напряжений в верхней зоне элемента.

Наблюдаемая зависимость стала основой для уточнения расчета воспринимаемой энергии и разработки обобщенного выражения  $E$ .

Для оценки воспринимаемой доли импульса использована зависимость, основанная на анализе поведения материала при повторных ударах и данных о распределении напряжений вдоль ствола:

$$E = \alpha S + \beta \log(H) - \gamma \rho, \quad (2)$$

где  $S$  — осадка за один удар, мм;  $H$  — высота падения ударной части;  $\rho$  — плотность грунта;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  — коэффициенты влияния.

Коэффициент  $\alpha$  отражает связь между осадкой и фактически воспринятой энергией. Чем выше осадка, тем большая часть импульса дошла до материала, поэтому  $\alpha$  показывает чувствительность модели к  $S$ .

Коэффициент  $\beta$  учитывает снижение эффективности увеличения высоты падения. Логарифмическая зависимость показывает замедление прироста осадки при росте  $H$ , что соответствует графикам динамического распределения напряжений и результатам испытаний.

<sup>2</sup> СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. Актуализир. ред. СНиП 2.02.03—85. М.: Минстрой России, 2021. 154 с.

Коэффициент  $\gamma$  корректирует выражение с учетом плотности грунта. При возрастании сопротивления среды снижается доля энергии, доходящая до ствола, поэтому влияние  $\rho$  имеет отрицательный знак.

Предложенная модель объединяет параметры удара, свойства грунта и фактическое поведение материала, не заменяя нормативную формулу потенциальной энергии, а дополняя ее, позволяя оценивать воздействие, которое действительно участвует в продвижении сваи в сложных грунтовых условиях.

Для сравнения двух подходов выполнен расчет по нормативной формуле и по предлагаемой модели. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

*Сравнение нормативного выражения энергии удара  
и воспринимаемой энергии по предлагаемой модели  
(разработано авторами на основании анализа рассматриваемых данных)*

Класс бетона	Осадка $S$ , мм	Плотность $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	$E_0 = mgH \cdot \eta$ , кН · мм	$E = \alpha S + \beta \log(H) - \gamma \rho$ , кН · мм
В4	6	2,2	22 095	$18\ 000 + 47,4 - 4400 = 13\ 647$
В6	4	2,0	22 095	$12\ 000 + 47,4 - 4000 = 8047$
В8	3	1,8	22 095	$9000 + 47,4 - 3600 = 5447$

### Выводы

Разница между нормативной энергией и воспринимаемой энергией сохраняется для всех классов бетона и зависит от плотности материала и осадки за удар. При увеличении плотности доля поглощенного импульса уменьшается, поэтому воспринимаемая энергия становится ниже и требует иного режима работы молота. Нормативная формула показывает только потенциальный уровень энергии оборудования и не отражает, какая ее часть действительно вызывает движение сваи.

Предложенная модель позволяет определить величину фактического импульса с учетом осадки, свойств грунта и особенностей бетона. Сравнение трех классов бетона подтверждает устойчивое снижение воспринимаемой энергии при увеличении плотности, что позволит заранее выбрать подходящую высоту удара, контролировать приближение к критическому уровню и устанавливать безопасный режим погружения в сложных грунтовых условиях.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Design optimisation of reinforced concrete pile foundation using Generalized Reduced Gradient algorithm / J. A. Dauda, S. A. Rahmon, I. A. Tijani, F. Mohammad, W. O. Okegbenro // *Frontiers in Engineering and Built Environment*. 2022. URL: [www.researchgate.net/publication/358723024\\_Design\\_Optimisation\\_of\\_Reinforced\\_Concrete\\_Pile\\_Foundation\\_using\\_Generalised\\_Reduced\\_Gradient\\_Algorithm](http://www.researchgate.net/publication/358723024_Design_Optimisation_of_Reinforced_Concrete_Pile_Foundation_using_Generalised_Reduced_Gradient_Algorithm).
2. *Abushama M., Al-Ers A., Alsharif A., Nasir M.* Embodied carbon optimisation of concrete pile foundations // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 310. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118109.
3. *Байбурун А. Х., Толкынбаев Т. А., Кочарин Н. В.* Функционально-стоимостной анализ технологии забивных свай // *Эксперт: теория и практика*. 2023. № 3(22). С. 48—57.
4. *Купчикова Н. В.* Формообразование концевых уширений свай в поперечном сечении и методика их деформационного расчета // *Вестн. гражданских инженеров*. 2015. № 1(48). С. 88—96.

5. *Гайдо А. Н.* Пути совершенствования технологических решений устройства свайных фундаментов жилых зданий в условиях городской застройки // *Подземное строительство*. 2015. № 12(19). С. 12—14.
6. *Ter-Martirosyan Z. G., Pronozin Y. A., Stepanov M. A.* Feasibility of pile-shell foundations with prestressed soil beds // *Soil mechanics and foundation engineering*. Springer New York Consultants Bureau. 2012. No. 4. Pp. 119—123.
7. *Тончий Д. В., Чупова З. Х.* Технологические особенности устройства подпорных стен методом буросекущих свай // *Изв. ТулГУ. Техн. науки*. 2024. Вып. 10. С. 357—360.
8. *Zhussupbekov A., Zhunussov Y., Tulegenov B., Musabekov B.* Static and dynamic testing of precast concrete joint piles installed with pre-drilling // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2025. URL: [www.link.springer.com/article/10.1007/s40515-025-00705-6](http://www.link.springer.com/article/10.1007/s40515-025-00705-6).
9. *Cannizzaro A.* Pile driving in glacial soil: stochastic modelling of boulder-induced premature refusal // *Master Thesis. KTH Royal Institute of Technology*. 2025. URL: [www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1959214/FULLTEXT02.pdf](http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1959214/FULLTEXT02.pdf).
10. *Kementzetzidis E., Van Dalen K., Metrikine A.* Gentle driving of piles at a sandy site combining axial and torsional vibrations: quantifying performance // *TU Delft Reports*. 2023. URL: [www.research.tudelft.nl/files/159680995/kementzetzidis\\_et\\_al\\_2023\\_gentle\\_driving\\_of\\_piles\\_axial\\_torsional\\_vibrations.pdf](http://www.research.tudelft.nl/files/159680995/kementzetzidis_et_al_2023_gentle_driving_of_piles_axial_torsional_vibrations.pdf).
11. *Федоров В. С., Купчикова Н. В.* Технологии устройства концевых уширений набивных и готовых свай и их влияние на формообразование конструкций фундамента // *Инженер.-строит. вестн. Прикаспия*. 2019. № 1(27). С. 37—40.
12. *Савинов А. В.* Экспериментальные исследования стальных и железобетонных свай малого сечения, погруженных вдавливанием в водонасыщенные глинистые грунты, статическими вдавливающими и выдергивающими нагрузками // *Городские агломерации на оползневых территориях : материалы I Междунар. науч. конф. : в 2 ч. Ч. 2*. Волгоград : ВолгГАСУ, 2005. С. 64—67.
13. *Wang Z., Li B., Zhang Y., Khan M.* Optimization of pile reinforcement in soft soils // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. No. 23. Art. 12443. URL: [www.mdpi.com/2076-3417/15/23/12443](http://www.mdpi.com/2076-3417/15/23/12443).
14. *Youwai S., Pamungmoon A.* Developing an explainable artificial intelligent model for predicting pile driving vibrations in Bangkok's subsoil // *Neural Computing and Applications*. 2025. Vol. 37. Iss. 18. URL: [www.arxiv.org/abs/2409.05918](http://www.arxiv.org/abs/2409.05918).
15. *Vahab M., Shahbodagh B., Haghghat E., Khalili N.* Application of physics-informed neural networks for forward and inverse analysis of pile-soil interaction // *International Journal of Solids and Structures*. 2023. URL: [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768323002160](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768323002160).
16. *Murthy V. N. S.* *Geotechnical engineering: principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. New York : Marcel Dekker, 2002. Pp. 741—751.

© *Весова Л. М., Тарасов А. А.*, 2026

*Поступила в редакцию*  
24.12.2025

*Ссылка для цитирования:*

*Весова Л. М., Тарасов А. А.* Оптимизация технологии погружения железобетонных свай в сложных грунтовых условиях // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 1(102). С. 14—21. DOI: 10.35211/18154360\_2026\_1\_14.

*Об авторах:*

**Весова Людмила Михайловна** — канд. техн. наук, доц. каф. технологий строительного производства, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; [kafedra\\_tsp@mail.ru](mailto:kafedra_tsp@mail.ru)

**Тарасов Андрей Александрович** — магистрант каф. технологий строительного производства, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; [tarasovandrey2015@mail.ru](mailto:tarasovandrey2015@mail.ru)

**Lyudmila M. Vesova, Andrei A. Tarasov**

**Volgograd State Technical University**

## **OPTIMIZATION OF THE DRIVING TECHNOLOGY FOR REINFORCED-CONCRETE PILES IN COMPLEX SOIL CONDITIONS**

The article examines the effect of impact driving on the performance of reinforced-concrete piles installed in complex soil conditions. The study demonstrates how longitudinal stress distribution along the pile shaft changes after the hammer blow and how concrete density influences material behavior. A detailed analysis of the technological stages of pile driving is presented, allowing the identification of operations that exert the greatest influence on process stability. Based on experimental data, a calculation model is proposed for determining the absorbed impact energy, taking into account pile penetration, hammer drop height, and soil resistance. Comparison of the model with the standard design expression enables more accurate assessment of the actual impact on the pile and supports the selection of a hammer operating mode that reduces the risk of damage during installation in heterogeneous soils.

**Key words:** reinforced-concrete piles, impact driving, complex soils, concrete structure, material loosening, impact energy, pile penetration, soil density, dynamic loading, safe driving mode, technological operations, optimization, adverse effects, efficiency of pile installation.

*For citation:*

Vesova L. M., Tarasov A. A. [Optimization of the driving technology for reinforced-concrete piles in complex soil conditions]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 1, pp. 14—21. DOI: 10.35211/18154360\_2026\_1\_14.

*About authors:*

**Lyudmila M. Vesova** — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; kafedra\_tsp@mail.ru

**Andrei A. Tarasov** — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; tarasovandrey2015@mail.ru