

УДК 681.3.06:624

**ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ**

**Д. В. ПРОКОПЕНКО**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*Рассмотрено применение интеллектуальных технологий для определения физико-механических свойств грунтового основания. Представлен подход к решению задачи, основанный на использовании радиально-базисной нейронной сети. Для определения эффективности предложенного подхода проводится проверка на основе реальных данных, полученных при исследовании грунтов.*

**Ключевые слова:** цилиндрическая свая, радиально-базисная нейронная сеть, физико-механические свойства.

**USE OF INTELLIGENT TECHNOLOGIES  
IN DETERMINING THE PHYSICAL AND MECHANICAL  
PROPERTIES OF A SOIL BASE**

**D. V. PROKOPENKO**

*Educational Institution “Sukhoi State Technical University  
of Gomel”, the Republic of Belarus*

*This article shows the use of intelligent technologies to determine the physical and mechanical properties of a soil base. The author presents an approach to solving the problem based on the use of a radial-basis neural network. To determine the effectiveness of the proposed approach, a check is carried out on real data obtained during the study of soils.*

**Keywords:** cylindrical pile, radial-basis neural network, physical-mechanical properties.

**Введение**

В современном мире интеллектуальные технологии проникают во все сферы жизни, в том числе и в строительную отрасль [1–5, 8]. Одним из основных преимуществ нейронных сетей является их способность обрабатывать и анализировать большие объемы данных, а также находить сложные зависимости между ними. В строительстве, где информация о материалах, конструкциях, геологических условиях и других факторах играет важную роль, нейронные сети могут быть использованы для прогнозирования различных параметров. Важный аспект проектирования и строительства зданий и сооружений – определение физико-механических свойств грунтового основания. Эта задача довольно сложна и требует применения специальных методов и технологий.

Среди интеллектуальных технологий, применяемых при определении физико-механических свойств грунтового основания, можно выделить методы анализа данных, нейросетевые модели, генетические алгоритмы и др. Их использование позволяет повысить точность прогнозирования не только физико-механических свойств грунтового основания, но и других параметров, таких как напряжения, деформации и т. д.

Целью настоящей работы является опеределение модуля деформации нелинейно-деформируемого грунтового основания вокруг одиночной цилиндрической сваи с помощью нейронной сети. Обучение и оценка качества работы нейронной сети осуществлены на примере реальной задачи – результатов полевых испытаний цилиндрических свай, проведенных в Научно-исследовательском республиканском унитарном предприятии по строительству «Институт БелНИИС» [6].

### **Постановка задачи**

В рамках исследования применения интеллектуальных технологий для определения физико-механических свойств грунтового основания необходимо решить следующие задачи:

- изучить основы физико-механических свойств грунтового основания и существующие методы их определения;
- исследовать возможность применения методов машинного обучения для определения физико-механических свойств грунтового основания;
- собрать данные о физико-механических свойствах грунтового основания для обучения модели;
- обучить модель на основе выбранных методов машинного обучения;
- оценить точность и эффективность обученной модели на основе тестовых данных;
- сравнить результаты, полученные с помощью интеллектуальных технологий, с результатами использования традиционных методов определения физико-механических свойств грунтового основания;
- сделать выводы о применимости интеллектуальных технологий для определения физико-механических свойств грунтового основания и их перспективности в данной области.

Рассматривается цилиндрическая свая в нелинейно-деформируемом грунтовом основании. При анализе деформационного процесса грунтового основания цилиндрической сваи можно выделить два этапа: погружение сваи и взаимодействие сваи с грунтовым основанием при действии сжимающей нагрузки. При погружении сваи происходит смятие грунта и его уплотнение вследствие внедрения тела сваи с последующим убыванием величины уплотнения до первоначального состояния. При действии на сваю сжимающей нагрузки происходит дальнейшее деформирование грунтового основания, и основные физико-механические характеристики грунта изменяются [7]. Геометрия уплотнения может быть определена только экспериментально, что требует больших затрат времени и денег. Для проведения исследования были выполнены специальные натурные эксперименты в РУП «Институт БЕЛНИИС» г. Минска. В данном исследовании отдельные результаты экспериментов приведены на рис. 1, который показывает изменение модуля деформации грунтового основания вокруг сваи в зависимости от консистенции грунта и глубины от поверхности грунта.

Одним из типов нейронных сетей, которые обладают большим потенциалом в этой области, являются радиально-базисные нейронные сети (RBF-сети). Их способность к аппроксимации сложных нелинейных функций и анализу больших объемов данных делает их особенно востребованными в строительном секторе. Как преимущество радиально-базисных нейронных сетей можно выделить их способность к адаптации и обучению на основе новых данных. Это позволяет сетям адаптироваться к изменяющимся условиям и улучшать свою производительность с течением времени.

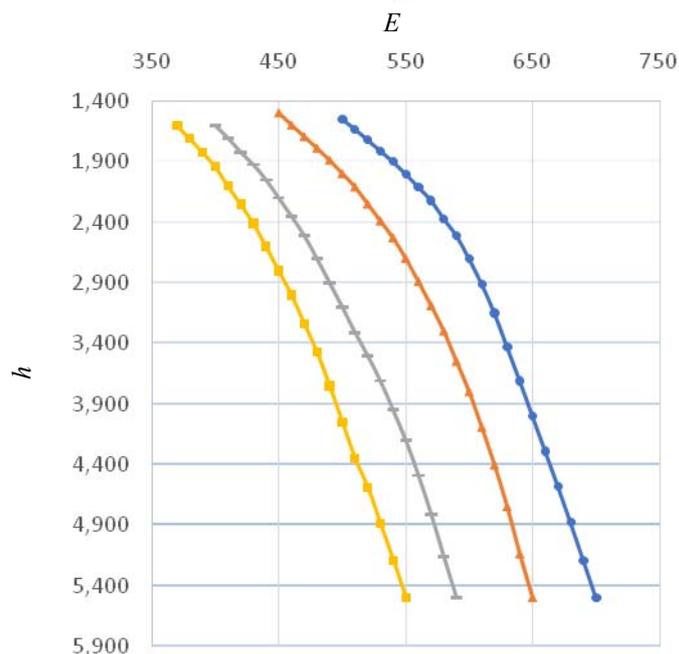


Рис. 1. Зависимость модуля деформации от консистенции грунта и глубины от поверхности грунта:

—●—  $B = -0,25$ ; —▲—  $B = -0,15$ ; —■—  $B = -0,05$ ; —■—  $B = 0,05$

### Построение радиально-базисной нейронной сети

Радиально-базисные нейронные сети – это тип искусственных нейронных сетей, которые используют радиально-базисную функцию в качестве функции активации скрытого слоя [7]. Схема RBF состоит из трех основных слоев: входного, скрытого и выходного (рис. 2).

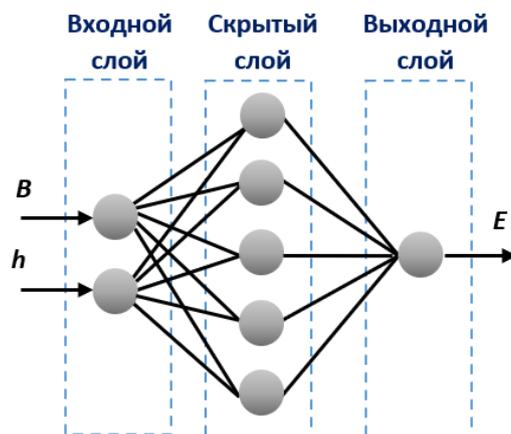


Рис. 2. Архитектура нейронной сети

Одним из важных параметров при выборе радиально-базисной сети является количество нейронов в скрытом слое. Чем больше нейронов, тем больше свободных параметров будет у сети, что может привести к переобучению и плохим результатам на основе новых данных. В то же время слишком малое количество нейронов может привести к недостаточному моделированию сложной функции.

Также следует учитывать выбор функции активации, которая должна быть выбрана с учетом конкретной задачи и типа данных.

Для выбора оптимальных параметров радиально-базисной сети можно провести серию экспериментов с разными значениями количества нейронов в скрытом слое и функций активации, и выбрать наилучшие результаты на основе тестовых данных.

Основная идея RBF-сети заключается в использовании нелинейных функций для того, чтобы нейроны скрытого слоя выполняли преобразование входных данных в пространство более высокой размерности. Это позволяет улучшить способность сети обнаруживать нелинейные зависимости между входными и выходными данными.

Функция активации RBF-сетей имеет форму радиальной базисной функции (RBF), которая зависит от расстояния между входными данными и центрами каждого нейрона скрытого слоя [7]. Центры нейронов выбираются на основе данных обучения, используя метод кластеризации. Затем веса каждого нейрона определяются с помощью линейной регрессии.

Основные этапы работы сети включают:

- вычисление радиально-базисной функции для одного центра и одного входного сигнала;
- вычисление матрицы интерполяции, которая используется для получения весовых коэффициентов модели на этапе обучения;
- обучение модели на заданном обучающем наборе данных, включая выбор центров RBF и вычисление весов;
- предсказание значений целевой переменной на основе полученных весов и входных данных;
- создание обучающих и тестовых данных, которые будут использоваться для обучения и оценки производительности модели. Обучающий набор данных содержит 60 входных сигналов и соответствующие им значения целевой переменной. Тестовый набор данных содержит 16 входных сигналов, для которых нужно предсказать значения целевой переменной;
- создание объекта с пятью скрытыми нейронами и обучение на основе обучающих данных;
- использование модели для предсказания значений целевой переменной на тестовых данных и выведение результатов.

Для применения RBF-сети используются функции для расчета расстояний между входными данными и центрами, а также функция для вычисления весов.

Расстояние между входными данными и центрами вычисляется с помощью евклидова расстояния:

$$r(x, c) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - c_i)^2},$$

где  $x$  – входные данные;  $c$  – центр кластера.

Для вычисления весов используется функция Гаусса:

$$\omega(x, c) = e^{-\beta r(x, c)^2},$$

где  $\beta$  – параметры ширины функции Гаусса:

Данная функция ранее была применена в различных задачах и показала свою эффективность. В контексте представленной работы автором была впервые применена эта функция для определения физико-механических характеристик нелинейно-деформируемого грунтового основания. Результаты исследования свидетельствуют о том, что рассматриваемая функция активации успешно справляется с поставленной задачей и демонстрирует высокую применимость.

Так, после обучения радиально-базисной нейронной сети была проведена проверка работы нейронной сети на основе реальных данных, полученных в Научно-исследовательском республиканском унитарном предприятии по строительству «Институт БелНИИС» (см. таблицу). Точность нейронной сети на основе тестовых данных (данные, которые нейронная сеть не видела во время обучения) составила 92 %.

#### Физико-механические характеристики грунтового основания

$B$	-0,25				-0,15				-0,05				0,05			
$E_s$	650	660	670	680	600	610	620	630	550	560	570	580	520	530	540	550
$E_n$	648	652	653	654	653	592	599	604	607	551	557	562	565	511	517	522

*Примечание:*  $B$  – коэффициент консистенции грунта;  $E_s$  – модуль деформации грунтового основания, полученный опытным путем;  $E_n$  – модуль деформации грунтового основания, полученный при помощи радиально-базисной нейронной сети.

#### Заключение

Рассмотрена задача определения модуля деформации нелинейно-деформируемого грунтового основания с использованием радиально-базисной нейронной сети. Исследование проведено на примере полевых испытаний винтовых свай, выполненных в Научно-исследовательском республиканском унитарном предприятии по строительству «Институт БелНИИС». Основным результатом работы заключается в разработке и применении радиально-базисной нейронной сети для определения модуля деформации грунтового основания. Метод RBF-сетей позволяет обнаруживать и моделировать нелинейные зависимости между входными и выходными данными, что повышает точность прогнозирования физико-механических свойств грунта. Результаты экспериментов показали, что обученная нейронная сеть демонстрирует высокую точность предсказания модуля деформации грунтового основания. Точность на основе тестовых данных составила 92 %, что свидетельствует об эффективности применения радиально-базисной нейронной сети в данной задаче.

Таким образом, использование интеллектуальных технологий, в частности, радиально-базисной нейронной сети, для определения физико-механических свойств грунтового основания является перспективным и эффективным подходом, который улучшает точность прогнозирования и облегчает процесс проектирования и строительства зданий и сооружений.

Дальнейшие исследования по этой теме могут быть направлены на расширение диапазона исследуемых параметров грунта, а также на сравнение результатов с другими методами определения физико-механических свойств грунтового основания. Это позволит наиболее полно изучить возможности и потенциал интеллектуальных технологий в данной области и сделать их применение еще более точным и надежным.

#### Литература

1. Бабушкина, Н. Е. Решение задачи определения механических свойств материалов дорожных конструкций с использованием нейросетевых технологий / Н. Е. Бабушкина, А. А. Ляпин // *Advanced Engineering Research*. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 285–292.
2. Бородин, Д. В. Возможности применения нейронных сетей в строительном материаловедении / Д. В. Бородин, С. С. Рябова // *Инженер. исслед.* – 2022. – № 5 (10). – С. 3–11.
3. Максимова, О. М. Развитие и применение нейросетевых технологий для задач механики и строительных конструкций / О. М. Максимова // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та*. – 2013. – № 8 (79). – С. 81–88.
4. Максимова, О. М. Создание и применение нейросетевой технологии для прогно-

- зирования в строительных конструкциях и строительной механике // Фундам. и приклад. проблемы науки : сб. науч. тр. I Междунар. симп. / Рос. акад. наук. – М., 2010. – Т. 2. – С. 3–24.
5. Кабирова, А. Р. Анализ возможностей искусственных нейронных сетей при прогнозировании осложнений в бурении / А. Р. Кабирова // Мат. моделирование в естеств. науках. – 2015. – Т. 1. – С. 183–187.
  6. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
  7. Быховцев, В. Е. Приближенный аналитический метод определения осадки винтовой сваи в нелинейно-деформируемом грунтовом основании с учетом его уплотнения / В. Е. Быховцев, Д. В. Прокопенко // Изв. Гомел. гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2012. – № 6 (75). – С. 110–114.
  8. Waziri, B. S. Artificial Neural Networks in Construction Engineering and Management / B. S. Waziri, K. Bala, Sh. A. Bustani // International Association for Sustainable Development and Management. – 2017. – Vol. 6. – P. 50–60.

### **References**

1. Babushkina N. E., Lyapin A. A. Solving the problem of determining the mechanical properties of road design materials using neural network technologies. *Advanced Engineering Research*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 285–292 (in Russian).
2. Borodin D. V., Ryabova C. C. Possibilities of using neural networks in construction materials science. *Inzhenernye issledovaniya = Engineering Research*, 2022, no. 5 (10), pp. 3–11 (in Russian).
3. Maksimova O. M. Development and application of neural network technologies for problems of mechanics and building structures. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2013, no. 8(79), pp. 81–88 (in Russian).
4. Maksimova O. M. Creation and application of neural network technology for forecasting in building structures and construction mechanics. *Fundamental'nye i prikladnye problemy nauki: sb. nauch. trudov I Mezhdunar. simp.* Moscow, 2010, vol. 2, pp. 3–24 (in Russian).
5. Kabirova A. R. Analysis of the capabilities of artificial neural networks in predicting drilling complications. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennykh naukakh*, 2015, vol. 1, pp. 183–187 (in Russian).
6. Osovskii S. *Neural networks for information processing*. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002. 344 p. (in Russian)
7. Bykhovtsev V. E., Prokopenko D. V. Approximate analytical method for determining the settlement of a screw pile in a nonlinear deformable soil base taking into account its compaction. *Izvestiya Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny = Proceedings Francisk Skorina Gomel State University*, 2012, no. 2 (75), pp. 110–114 (in Russian).
8. Waziri B. S., Waziri B. S., Bala K., Bustani Sh. A. Artificial Neural Networks in Construction Engineering and Management. *International Association for Sustainable Development and Management*, 2017, vol. 6, pp. 50–60. for information processing]. M.: Finansy i statistika, 2002. – 344 p. (in Russian).