

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА БАШЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОПРОВ И ИХ ОСНОВАНИЙ

Такшеева Ю.Е., Третенков И.В.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: башенный копер, железобетонный копер, расчет оснований, проектирование надшахтных сооружений, крен, осадка, фундамент, МКЭ.

Аннотация. В рамках исследования выполнен сопоставительный анализ двух принципиально различных методик, регламентирующих порядок расчета башенных железобетонных копров и их фундаментов, взаимодействующих с грунтовым основанием. Выполнен детальный анализ нормативных баз в области проектирования надшахтных сооружений, а также сравнительная оценка критериев методик. Дополнительно проведено сопоставление методов определения осадок и крена сооружений, осуществлена оценка подходов к учету совместной работы элементов системы, включающей конструкцию копра, его фундамент и грунтовый массив. Проведено численное моделирование в программном комплексе PLAXIS 3D с целью визуализации расчетов, базирующихся на актуальной нормативно-правовой документации, для башенного железобетонного копра высотой 52 метра, опирающегося на кольцевой фундамент. В рамках данного исследования выявлены существенные расхождения между результатами численного моделирования и результатами, полученными в ходе вычисления на основе методики, предложенной в 1975 году. Анализ показал, что упомянутая методика приводит к завышенным значениям расчетных осадок и крена, что может существенно влиять на точность и надежность проектных решений в области строительства ответственных сооружений. В процессе анализа установлено, что Руководство, разработанное Донецким Промстройниипроект, не охватывает полный спектр физико-механических характеристик нижележащих слоев грунта, что приводит к некорректным результатам при оценке их прочностных и деформационных свойств. Кроме того, выявлено систематическое завышение коэффициентов сочетания кратковременных нагрузок, что существенно искажает реальную картину распределения напряжений и деформаций в грунтовой среде.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CALCULATION METHODOLOGY FOR TOWER REINFORCED CONCRETE HEADFRAMES AND THEIR FOUNDATIONS

Taksheeva Yu.E., Tretenkov I.V.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: tower headframe, reinforced concrete headframe, foundation calculation, design of shaft structures, inclination, settlement, foundation, FEM.

Abstract. This study included a comparative analysis of two fundamentally different methodologies governing the design of reinforced concrete tower headframes and their foundations, which interact with the underlying soil. A detailed analysis of regulatory frameworks for the design of shaft structures was conducted, along with a comparative assessment of the criteria for the methods. Additionally, methods for determining the settlement and inclination of structures were compared, and approaches to accounting for the combined effects of system elements, including the headframe structure, its foundation, and the underlying soil, were assessed. FEM was performed using the PLAXIS 3D software package to visualize calculations based on current regulatory documentation for a 52-meter-tall reinforced concrete tower headframe supported by a ring foundation. This study revealed significant discrepancies between the numerical modeling results and those obtained using the calculation method proposed in 1975. The analysis revealed that the aforementioned methodology leads to overestimated calculated settlements and tilts, which can significantly impact the accuracy and reliability of design solutions for critical structures. The analysis revealed that the Guidelines developed by Donetsk Promstroyniiproekt do not cover the full range of physical and mechanical properties of underlying soil layers, leading to incorrect results when assessing their strength and deformation properties. Furthermore, a systematic overestimation of short-term load combination factors was identified, significantly distorting the true distribution of stresses and deformations in the soil environment.

Введение

Башенные железобетонные копры – конструкции особого назначения, применяемые в горнодобывающей промышленности и выполняющие функции технологического оборудования

[1-3]. Надежность и безопасность надшахтных сооружений критически важны для устойчивости всего шахтного подъемного комплекса [4-6]. Проектирование башенных железобетонных копров традиционно основывалось на нормативной документации [7-9]. Важным этапом в развитии области проектирования копров стало «Руководство по расчету башенных копров угольных и рудных шахт», выпущенное в 1975 году издательством «Стройиздат».

Руководство, разработанное Донецким Промстройинипроектом и другими профильными институтами, включало в себя передовые научные подходы того времени. В частности, оно предусматривало расчет по двум группам предельных состояний, а также учитывало специфические динамические и технологические нагрузки [10-12]. Однако за последние 50 лет произошли значительные изменения в нормативной базе. Современные своды правил: СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» и СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», содержат новые технические требования по назначению нагрузок, воздействий и их сочетаний, а также указания по проектированию зданий и сооружений при строительстве, которым уже не отвечает Руководство 1975 г.

Проблемная ситуация заключается в наличии методического разрыва. Руководство 1975 года сохраняет определенное влияние в экспертной среде и используется при оценке несущей способности эксплуатируемых копров, запроектированных по старым нормам. С другой стороны, часть его положений формально утратили силу, а другие - не учитывают современные требования к надежности, долговечности и экономической эффективности в полной мере в рамках современного строительства. Вопрос о том, насколько результаты расчета по устаревшей методике коррелируют с расчетами по действующим СП, а также какова величина расхождений в оценках несущей способности несущих конструкций, осадок и крена фундамента, остается не исследованным системно. Отсутствие сравнительного анализа не позволяет обоснованно подходить к реконструкции объектов советской постройки, модернизации их технологического оборудования (влекущей рост нагрузок) и разработке новых специализированных норм, учитывающих отраслевую специфику.

Целью настоящего исследования является проведение всестороннего и комплексного сравнительного анализа методологических подходов, расчетных моделей и численных результатов, установленных в Руководстве 1975 года и действующих нормативных документах СП 20.13330.2016 и СП 22.13330.2016.

Исследование направлено на выявление различий в методологических подходах, регламентированных вышеуказанными нормативными документами. Особое внимание уделяется анализу численных результатов, полученных на основе этих методик, что позволяет выявить их эффективность и применимость в различных условиях эксплуатации.

Методы исследования

В ходе выполнения настоящей работы проведён анализ ключевых факторов, определяющих методологию расчёта надшахтных сооружений. Сопоставлению подлежали две расчётные базы: действующие своды правил СП 20.13330.2016 и СП 22.13330.2016, а также Руководство по расчёту башенных копров угольных и рудных шахт 1975 года. Целью сопоставления является выявление расхождений в подходах и обоснование недостатков устаревшей методики. Результаты сравнительного анализа по установленным критериям приведены в таблице 1.

Результаты и обсуждение

Анализ данных, представленных в таблице 1, предоставляет возможность сформулировать следующие выводы. Сравнительный анализ коэффициентов надежности по нагрузке, представленных в СП 20.13330.2016 и СП 22.13330.2016, с аналогичными значениями, указанными в Руководстве 1975 года, демонстрирует их значительное увеличение. Приведенный факт указывает на то, что современные расчетные методики предусматривают более высокую степень компенсации погрешностей, технологических отклонений и непредвиденных нагрузок. Это обусловлено возросшими требованиями к ответственности проектируемых инженерных сооружений и необходимостью обеспечения их надежности и безопасности.

Табл. 1. Сравнительные критерии методик расчета сооружения

Критерий	Применяемая методика расчета	
	Нормативно правовая документация: СП 20.13330.2016, СП 22.13330.2016.	Руководство по расчету башенных копров угольных и рудных шахт, 1975 г.
1. Коэффициент надежности по нагрузкам от:		
– ветровой нагрузки	1,4	1,3
– резонансного вихревого возбуждения	1,0	–
– снега	1,4	1,4
– гололеда	1,8	1,3
– температурных климатических воздействий	1,1	1,0
2. Коэффициенты сочетания кратковременных нагрузок	Учитывается характер нагружения: коэффициент сочетаний, соответствующий основной нагрузке – 1,0; коэффициент сочетаний второй нагрузки – 0,9; коэффициент сочетаний для остальных нагрузок – 0,7.	Зависят от числа одновременно учитываемых нагрузок: одна – 1,0; две/три – 0,9; четыре и более – 0,85.
3. Определение крена сооружения	$i = \frac{1 - \nu^2}{E} k_e \frac{Ne}{(a/2)^2},$ где k_e – коэффициент, принимаемый по таблице 5.9; E и ν – модуль и коэффициент деформации грунта основания; N – вертикальная составляющая равнодействующей всех нагрузок на фундамент в уровне его подошвы; e – эксцентриситет; a – сторона, в направлении которой действует момент	$\theta = \frac{i_r + i_e + i_n}{1 - i_G},$ где i_n – наклон основания от неравномерных просадок в результате горных выработок; i_r, i_e, i_G – наклоны копра и его фундамента в результате действия моментных нагрузок)
Максимально допустимое значение крена (для башенного копра)	0,004	0,004
4. Определение осадок основания фундамента сооружения	$s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{zy,i}) h_i}{E_i} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zy,i} h_i}{E_{e,i}},$ где β – безразмерный коэффициент, $\beta = 0,8$; $\sigma_{zp,i}$ – вертикальное напряжение от внешней нагрузки в i-ом слое грунта по вертикали; E_i – модуль деформации i-ого слоя грунта; h_i – толщина i-го слоя грунта; $\sigma_{zy,i}$ – вертикальное напряжение в i-ом слое грунта от собственного веса; $E_{e,i}$ – модуль деформации i-ого слоя грунта; n – число слоев грунта)	$S = S_G + S_M + S_{II},$ где S_G – осадка центра фундамента сооружения от вертикальных нагрузок на основание; S_M – осадка фундамента от искривления основания; S_{II} – осадка центра фундамента сооружения от моментных нагрузок
Максимально допустимая осадка (для башенного копра)	20 см	30 см

Коэффициенты сочетания кратковременных нагрузок, приведенные в действующих сводах правил, учитывают уменьшение вероятности одновременного достижения несколькими нагрузками их расчетных значений. Указанные коэффициенты принимаются ниже, чем в Руководстве для проектирования 1975 г., что свидетельствует о завышенной оценке суммарного расчётного усилия при сочетании нагрузок по устаревшей методике.

Согласно Руководству 1975 г. при расчёте крена сооружения менее полно учитываются деформационные и прочностные характеристики грунтового основания, что свидетельствует о недостаточной детализации проектируемого основания и отсутствии углубленного подхода к оценке неравномерных деформаций оснований.

В действующей нормативно-правовой базе расчётная зависимость для определения осадок основания учитывает физико-механические характеристики не только несущего слоя грунта в уровне подошвы фундамента, но и всей толщи нижележащих слоёв в пределах сжимаемой толщи. Такой подход обеспечивает комплексную оценку передачи нагрузки от сооружения на фундамент и последующего распределения воздействия в грунтовом массиве [13, 14].

Следует отметить, что значение предельно допустимой осадки для надшахтных копров, было снижено на 10 см. Указанное изменение свидетельствует об ужесточении требований к деформациям оснований, что отражает развитие методологии обеспечения безопасности и эксплуатационной надёжности промышленных объектов.

Сделанные теоретические выводы будут подкреплены практическими расчетами в следующем разделе.

Выводы

В рамках сравнительного анализа обеих расчётных методик выполнено определение численных значений осадок и крена башенного копра при идентичных исходных параметрах. В рамках расчета, основанного на нормативно-правовой документации, будет применено численное моделирование в программном комплексе PLAXIS 3D.

В качестве исходных параметров принимался железобетонный башенный копёр высотой 52 м с размерами в плане 12×18 м. Фундамент принят кольцевого типа с внешним диаметром 19 м и внутренним равным 7 м. Высота фундамента составляет 6 м.

В результате применения формул осадки башенного копра по методике, изложенной в таблице 1 Руководства 1975 г., получено значение 21,4 мм. В то же время численное моделирование в программном комплексе PLAXIS 3D (рис. 1) даёт величину осадки 4,284 мм, что существенно ниже. Выявленное расхождение свидетельствует о систематическом завышении расчётных осадок, получаемых по устаревшей методике, относительно показателей, соответствующих современному нормативному подходу.

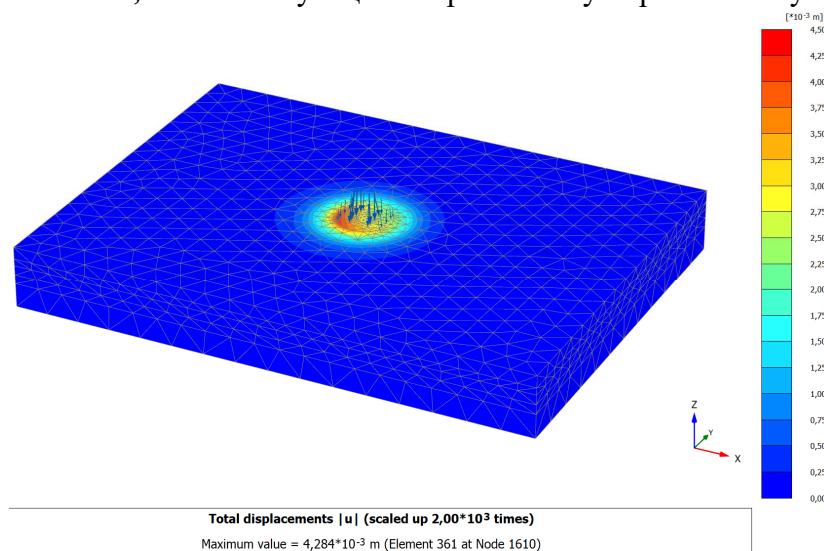


Рис. 1. Осадки основания кольцевого типа фундамента, полученные в программном комплексе PLAXIS 3D

В процессе вычисления крена в соответствии с методикой, изложенной в руководстве 1975 года, было получено значение 0,0002. В ходе моделирования аналогичный параметр составил 0,0001 (см. рис. 2). Данные значения демонстрируют расхождение в два раза, что свидетельствует о наличии избыточного запаса прочности относительно результатов моделирования.

Стоит отметить, что максимально допустимый крен, согласно обеим применяемым методикам расчета, составляет 0,004, следовательно, полученные величины крена находятся в оптимальном диапазоне.

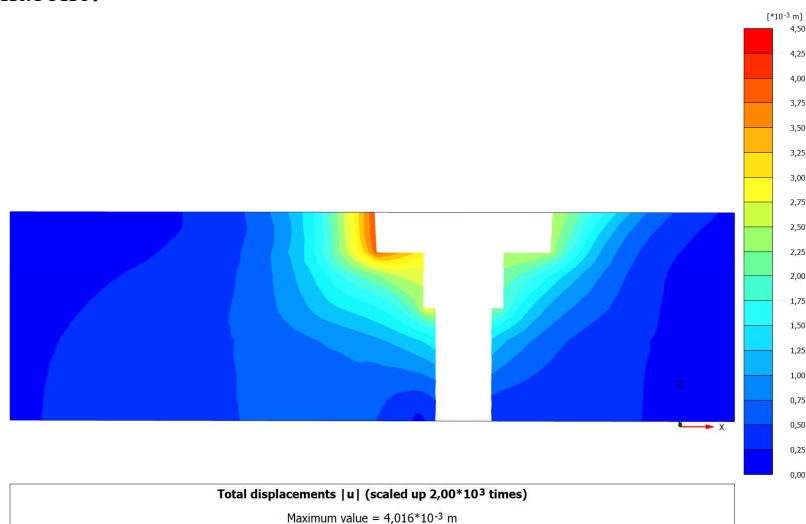


Рис. 2. Разрез модели кольцевого фундамента в программном комплексе PLAXIS 3D

Заключение

Сравнение коэффициентов надежности по нагрузке (СП 20.13330.2016 и СП 22.13330.2016 с Руководством 1975 года) показывает их значительное увеличение в современных нормах, что отражает повышение требований к компенсации погрешностей, технологических отклонений и непредвиденных воздействий в условиях повышенной ответственности сооружений. Коэффициенты сочетания кратковременных нагрузок в СП 20.13330.2016 ниже, чем в Руководстве 1975 года, что указывает на завышение расчетных усилий от сочетания нагрузок в устаревшей методике. Методика 1975 года не полностью учитывает деформационные и прочностные свойства грунтового массива при расчете крена, что ограничивает точность оценки неравномерных деформаций. В отличие от нее, действующие нормы (СП 22.13330.2016) предусматривают определение осадок с учетом физико-механических характеристик всех слоев в пределах сжимаемой толщи, обеспечивая комплексный анализ взаимодействия в системе «копер – фундамент – основание».

Допустимая предельная осадка для надшахтных копров снижена на 10 см, что подтверждает ужесточение требований к деформациям и эволюцию подходов к безопасности промышленных объектов.

Численное моделирование в ПК PLAXIS 3D выполнено для железобетонного башенного копра высотой 52 м и размерами в плане 12×18 м с применением кольцевого фундамента ($D_{нар} = 19$ м, $D_{вн} = 7$ м, $h = 6$ м). Расчет по методике 1975 года дал осадку 21,4 мм; моделирование – 4,284 мм. Крен составил 0,0002 и 0,0001 соответственно, что вдвое ниже. Данные расхождения подтверждают систематическое завышение осадок и наличие избыточного запаса в устаревшей методике.

Установленные расхождения в расчётных подходах отражают прогресс строительной науки и повышение нормативных требований к проектированию ответственных сооружений. Одновременно с этим фиксируется отсутствие актуализированного отраслевого руководства по расчёту башенных железобетонных копров, что формирует проблемное поле в части развития проектирования надшахтных сооружений.

Список литературы

1. Третенков И.В., Такшеева Ю.Е. Обоснование параметров шахтного железобетонного копра // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2025. – №34. – С. 93-101. – doi.org/10.26160/2658-3305-2025-34-93-101.
2. Королев Р.И., Уразов Д.В. Обоснование компоновочной схемы надшахтного комплекса высокопроизводительного скипового подъема // Горная механика и машиностроение. – 2024. – №4. – С. 45-48.
3. Царев Р.И., Тарасов В.В., Жуков А.А., Пригара А.М. Опыт применения георадара при обследовании оснований надшахтных зданий калийных рудников // Геотехника. – 2021. – Т. XIII, №4. – С. 80-91. – doi.org/10.25296/2221-5514-2021-13-4-80-91.
4. Пестрикова В.С., Тарасов В.В., Загвоздкин И.В. Жизненные циклы системы комплекса шахтных стволов на Верхнекамском месторождении // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2021. – Вып. 3. – С. 213-220. – doi.org/10.46689/2218-5194-2021-3-1-207-215.
5. Dengaev A., Maksimenko A., Shut K., Novikova A., Eremenko O., Arteev K., Getalov A., Sargin B., Safiullina E. Development of technology for the preparation of heavy-duty concrete mixtures by processing with an ultrasonic multi-frequency acoustic field // Journal of Applied Engineering Science. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 917-927. DOI: 10.5937/jaes0-44277.
6. Тулин П.К., Очуров В.И., Шубин А.А., Сотников Р.О. Методика испытаний фибробетона // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – №8. – С. 129-141. – doi.org/10.25018/0236_1493_2021_8_0_129.
7. Прокопов А.Ю., Шевченко Р.Ю., Прокопова М.В. Обоснование параметров фундаментов копров и надшахтных зданий с учетом взаимодействия с вертикальными шахтными стволами // Строительство и архитектура – 2022: материалы международной научно-практической конференции факультета промышленного и гражданского строительства. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2022. – С. 151-153.
8. Иванова П.В. Особенности строительства сейсмостойких зданий с каркасной конструктивной системой // Строительство и архитектура – 2023: материалы международной научно-практической конференции факультета промышленного и гражданского строительства. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2023. – С. 274-276.
9. Новиков В.В., Бочкарева Т.М., Пономарев А.Б. Исследование характера работы ленточного фундамента из перекрестных балок с опорными оболочками на основаниях, подверженных процессам карстообразования // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2014. – №3(15). – С. 16-23.
10. Голдин С.В., Хохлов В.В., Камбурова Л.А. Усиление конструкции устья вертикального шахтного ствола // Маркшейдерский вестник. – 2024. – №3(153). – С. 60-65.
11. Меркулова А.Д., Зубарев В.С. Hardening Soil: практический опыт применения результатов инженерно-геотехнических изысканий // Метро и тоннели. – 2021. – №3. – С. 34-37.
12. Андреев В.Е. Проектирование, строительство и эксплуатация башенных копров. – М.: Недра, 1970. – 240 с.
13. Ponomaryov A.B., Akbulayakova E.N., Zakharov A.V. Water Saturation Influence on Construction Properties of Eluvial Soils in the Foundation Bases // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2024, vol. 61, pp. 371-374. doi.org/10.1007/s11204-024-09985-5.
14. Ponomaryov A.B., Zaharov A.V., Ofrikhter I.V., Shenkman R.I. Estimation of soil properties by an artificial neural network // Magazine of Civil Engineering. 2022, vol. 110(2), p. 11011. – doi.org/10.34910/MCE.110.11.

References

1. Tretenkov I.V., Taksheeva Yu.E. Substantiation of parameters of a mine reinforced concrete headframe // Transport, Mining and Construction Machinery: Science and Production. 2025, no. 34, pp. 93-101. doi.org/10.26160/2658-3305-2025-34-93-101.
2. Korolev R.I., Urazov D.V. Justification of the layout scheme of the surface complex for high-performance skip hoisting // Mining Mechanics and Mechanical Engineering. 2024, no. 4, pp. 45-48.
3. Tsarev R.I., Tarasov V.V., Zhukov A.A., Prigara A.M. Experience of using ground penetrating radar in inspecting foundations of mine shaft buildings at potash mines // Geotechnics. 2021, vol. XIII, no. 4, pp. 80-91. doi.org/10.25296/2221-5514-2021-13-4-80-91.
4. Pestrikova V.S., Tarasov V.V., Zagvozdskiy I.V. Life cycles of the complex of mine shaft systems at the Verkhnekamskoye deposit // News of the Tula State University. Earth Sciences. 2021, iss. 3, pp. 213-220. doi.org/10.46689/2218-5194-2021-3-1-207-215.
5. Dengaev A., Maksimenko A., Shut K., Novikova A., Eremenko O., Arteev K., Getalov A., Sargin B., Safiullina E. Development of technology for the preparation of heavy-duty concrete mixtures by processing with an ultrasonic multi-frequency acoustic field // Journal of Applied Engineering Science. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 917-927. DOI: 10.5937/jaes0-44277.
6. Tulin P.K., Ochukrov V.I., Shubin A.A., Sotnikov R.O. Test method for fiber-reinforced concrete // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2021, no. 8, pp. 129-141. doi.org/10.25018/0236_1493_2021_8_0_129.
7. Prokopov A.Yu., Shevchenko R.Yu., Prokopova M.V. Substantiation of parameters for headframe and surface building foundations considering interaction with vertical mine shafts // Construction and Architecture – 2022:

- Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of the Faculty of Industrial and Civil Engineering. – Rostov-on-Don: DSTU, 2022. – P. 151-153.
8. Ivanova P.V. Features of the construction of earthquake-resistant buildings with a frame structural system // Construction and Architecture – 2023: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of the Faculty of Industrial and Civil Engineering. – Rostov-on-Don: DSTU, 2023. – P. 274-276.
 9. Novikov V.V., Bochkareva T.M., Ponomarev A.B. Investigation of the behavior of strip foundations made of cross beams with support shells on foundations subject to karst formation processes // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urban Studies. 2014, no. 3(15), pp. 16-23.
 10. Goldin S.V., Khokhlov B.V., Kamburova L.A. Strengthening of the vertical mine shaft mouth structure // Mine Surveying Bulletin. 2024, no. 3(153), pp. 60-65.
 11. Merkulova A.D., Zubarev V.S. Hardening Soil: practical experience in applying the results of engineering and geotechnical investigations // Metro and Tunnels. 2021, no. 3, pp. 34-37.
 12. Andreev V.E. Design, construction and operation of tower headframes. – M.: Nedra, 1970. – 240 p.
 13. Ponomaryov A.B., Akbul'yakova E.N., Zakharov A.V. Water Saturation Influence on Construction Properties of Eluvial Soils in the Foundation Bases // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2024, vol. 61, pp. 371-374. doi.org/10.1007/s11204-024-09985-5.
 14. Ponomaryov A.B., Zaharov A.V., Ofrikhter I.V., Shenkman R.I. Estimation of soil properties by an artificial neural network // Magazine of Civil Engineering. 2022, vol. 110(2), p. 11011. – doi.org/10.34910/MCE.110.11.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Такшеева Юлия Евгеньевна – студент	Taksheeva Yulia Evgenievna – student
Третенков Игорь Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры Строительства горных предприятий и подземных сооружений	Tretenkov Igor Viktorovich – candidate of geological and mineral sciences, associate professor of the Department of construction of mining enterprises and underground structures
ju.taksh@yandex.ru	

Получена 13.02.2026