

References

1. Gusev, B. V. Formation of structure of composite materials and their properties / B. V. Gusev, V. I. Kondrashchenko, B. P. Maslov, A.S. Fayvusovich. – M.: Scientific world, 2006. – 560 p.
2. Kuznetsova, I.N. Influence of mineral structure and porous Structures betweenporous partitions on thermal conductivity cellular concrete / I.N. Kuznetsova, O. A. Kuznetsov, A.F. Kosach, M. A Rashchupkina // News of higher education institutions. Construction. – 2010. – № 6. – Pp. 24-27.
3. Baloyan, B. M. *Nanomaterialy. Classification, features of properties, application and technologies of receiving*. Moscow, 2007. – 125 p.
4. Akhvedov, I.N. Fundamentals of physics the concrete / I.N. Akhvedov: Textbook for higher education institutions – M.: Stroyizdat, 1981. – 464 p.
5. Shmitko, E.I. Himiya of cement and the knitting substances / E.I. Shmitko, A.V. Krylov, V. V. Shatalov. SPb., 2006. – 206 p.
6. Fokin, K.F. *Stroitel'naya of the heating engineer of the protecting parts of buildings* / Under the editorship of Yu.A. Tabunshchikov, V. G. Gagarin, the 5th prod. Moscow, AVOK-PRESS, 2006, 256 p.
7. Gusev, B. V. *Prochnost of polydisperse composite material, like cement concrete and feature of the intense deformed condition of such material at action of the squeezing loadings*. Moscow, TsISN, 2003, 37 p.
8. Kuznetsova, I.N. Technology of foamed concrete on the basis of peat / I.N. Kuznetsova, M.A. Rashchupkina, S.V. Zhukov // Vestnik SIBADI. –2014. – № 4 (38). – Pp. 72–77.
9. Kuznetsova, I.N. Influence of the main minerals of a cement stone on its structure and properties / I.N. Kuznetsova, M.A. Rashchupkin, A.F. Kosach, N.A.Gutareva // News of higher education institutions. Construction. – 2015. – №. 8 (680). – Pp. 25–33.

Кузнецова Ирина Николаевна (Россия, г. Омск) – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций Сибирской автомобильно-дорожной академии "СибАДИ" (644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: inkuzntcova@mail.ru).

Ращупкина Марина Алексеевна (Россия, г. Омск) – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалы и специальные технологии Сибирской автомобильно-дорожной академии "СибАДИ" (644080, Россия, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: manana2003@yandex.ru).

Kuznetsova Irina Nikolaevna (Russian Federation, Omsk) – Ph. D. in Technical Sciences, Ass. Professor, Department of Building structures, State Automobile and Highway Academy "SibADI", Omsk, Russia (644080, Russia, Omsk, Mira ave., 5, e-mail: inkuzntcova@mail.ru).

Raschupkina Marina Alekseevna (Russian Federation, Omsk) - Ph. D. in Technical Sciences, Ass. Professor, Department of Building structures, State Automobile and Highway Academy "SibADI", Omsk, Russia (644080, Russia, Omsk, Mira av., 5, e-mail: manana2003@yandex.ru).

УДК 625.7

СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫСОКОЙ НАСЫПИ ИЗ ЗОЛОШЛАКОВОЙ СМЕСИ

Лунёв А.А.¹, Сиротюк В.В.¹, Безделов Н.С.²

¹Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия «СибАДИ», Омск, Россия;

²АО «Институт Гипростроймост» - Санкт-Петербург, Россия.

Аннотация. В статье рассматривается возможность использования программных комплексов, в основе которых заложен метод конечных элементов (ZSoil, Plaxis, GEO5 FEM), для оценки устойчивости откосных частей насыпей автомобильных дорог из золошлаковой смеси. В работе приводятся результаты численного моделирования и оценки устойчивости откосной части насыпи автомобильной дороги 1В категории высотой 15 м из золошлаковой смеси Каширской ГРЭС-4. И их сравнение с результатами оценки общей устойчивости этих же конструкций по широко применяемому в практике строительства методом предельного равновесия (Bishop, Fellenius, Шахуняни).

Ключевые слова: метод конечных элементов, метод снижения прочности, оценка устойчивости откосов, золошлаковые смеси.

Введение

В последнее время на территории Российской Федерации началась реализация пилотных проектов транспортных сооружений,

земляное полотно которых выполнено из золошлаковых смесей [1]. Согласно СП 34.13330.2012 [2] этот техногенный грунт относится к категории особых и применение его

в каждом конкретном случае должно обосновываться путем выполнения соответствующих расчетов.

Наиболее распространенные виды деформаций земляного полотна автомобильных дорог - это сдвиги, формирующиеся при потере общей устойчивости откосных частей насыпей и выемок. Поэтому при строительстве каждого подобного объекта из золошлака, требуется выполнение комплексной оценки устойчивости откосных частей насыпей [3].

В современной практике проектирования транспортных сооружений для оценки устойчивости обычно используют методы предельного равновесия, такие как метод Бишопа, Шахунянца, Маслова-Берера, Терцаги-Крея, Гильдена, Сарма, Янбу, Спенсера, Morgenstern-Price и т.д. В основе всех этих методов лежит определение сдвигающих и удерживающих усилий и не учитывается напряженно-деформированное состояние осно-

вания насыпи, которое возникает в результате возведения земляного полотна [4, 5].

В то же время в практике проектирования инженерных сооружений широкое распространение получают программные комплексы, реализующие методы численного моделирования (ABAQUS, ANSYS, ПК Ли́ра, Elcut, Plaxis, Phase2, FLAC, ZSoil, GEO-5 и т.д.) и лишенные этого недостатка. Большинство этих программ базируется на методе конечных элементов (МКЭ) и активно применяются при решении задач инженерной геотехники и проектирования.

Использование этих современных инструментов позволяет решать широкий круг геотехнических задач (рис.1) и получать результаты высокой точности и степени соответствия реальным условиям. Но, к сожалению, до сих пор эти программные комплексы не заняли достойного места при проектировании насыпей автомобильных дорог.

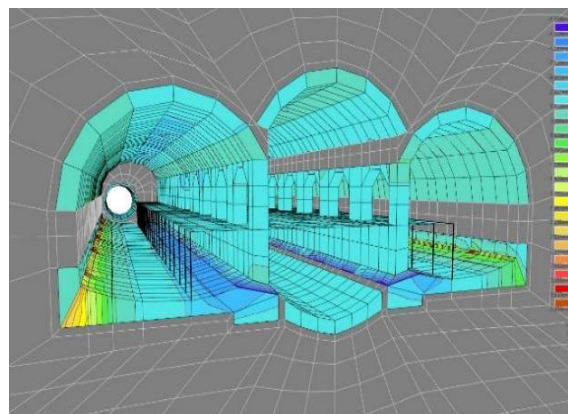
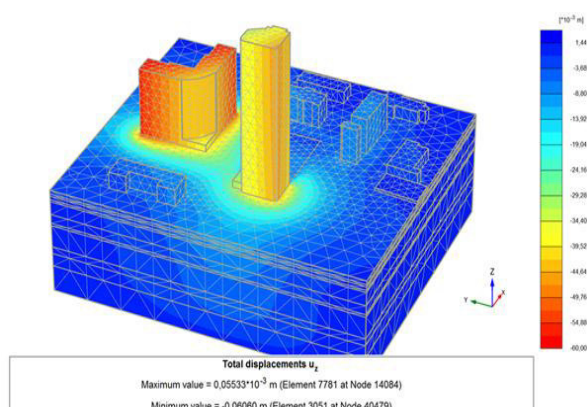


Рисунок 1 – Примеры геотехнических расчетов, выполненных методом конечных элементов: слева – расчет осадок основания зданий; справа – модель станции метро

Моделирование конструкций из золошлаковых смесей с использованием программных комплексов реализующих метод конечных элементов

Для решения задачи был выполнен анализ устойчивости откосов с использованием программных комплексов (*ZSoil*, *Plaxis*, *GEO5 FEM*) и сравнение полученных результатов с традиционными методами предельного равновесия.

В качестве примера были рассмотрены конструкции земляного полотна с применением золошлаковых смесей из отвала Каширской ГРЭС, использованные при строительстве первой в России транспортной развязки на автомобильной дороге 1В категории с высотой насыпи до 15 м при пересечении в раз-

ных уровнях железнодорожных путей на 87 км перегона Михнево - Жилево Московской железной дороги в Ступинском районе, вблизи д. Жилево, сданной в эксплуатацию в январе 2016 года.

Для моделирования конструкции "Насыпь+Основание" были использованы упругопластические модели Мора-Кулона (*Plaxis*, *ZSoil*, *GEO 5 FEM*) и Друкера-Прагера (*ZSoil*, *GEO 5 FEM*), которые включают пять основных параметров грунта: модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν , угол внутреннего трения ϕ , удельное сцепление c и угол дилатансии ψ . И два параметра удельного веса грунта: в насыщенном водой состоянии γ_{sat} и ненасыщенном γ_{unsat} [6]. Различия в представленных моделях имеются только в фор-

ме поверхности текучести и представлены в таблице 1 [7].

Таблица 1 – Различие в упругопластических моделях

Название	Уравнение характеризующее поверхность текучести
Модель Кулона-Мора	$\Phi_{MC}(\sigma, c) = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) + (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \sin \varphi - 2c \cos \varphi = 0$
	где $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ - наибольшее и наименьшее главное напряжение; c, φ - удельное сцепление и угол внутреннего трения;
Модель Друкера-Прагера	$\Phi_{DP}(\sigma, c) = \sqrt{3J_2} + \eta I_1 - \xi c$ $\eta = \frac{6 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 \pm \sin \varphi)}; \xi = \frac{6 \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 \pm \sin \varphi)};$
	где: I_1 - первый инвариант тензора напряжений; J_2 - второй инвариант девиатора напряжений;

Так как в процессе инженерно-геологических изысканий угол дилатансии не был определен, он вычислялся по эмпирической зависимости [8]:

$$\psi = \varphi - 30^\circ \quad (1)$$

Параметры грунтов для создания модели были получены по результатам инженерно-геологических изысканий на площадке строительства и исследовании проб золошлака с четвертой секции золоотвала Каширской ГРЭС-4, выполненных лабораторией "Мосгеотрест". Расчетные параметры для рассматриваемых моделей приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Параметры грунтов

№ слоя	Название грунта	$\gamma_{unsat}, \text{кН/м}^3$	$\gamma_{sat}, \text{кН/м}^3$	$E, \text{МПа}$	ν	$c, \text{кПа}$	$\varphi, ^\circ$	$\psi, ^\circ$	Тип материала
1	ЗШС Каширской ГРЭС-4	14,32	18,05	27,0	0,35	22	31,7	1,7	дренированный
2	Глина тугопластичная	15,4	19,52	9,5	0,36	43	16,9	0	недренированный
3	Суглинок тугопластичный	16,78	19,52	60,0	0,36	29	18,5	0	недренированный
4	Песок мелкий	16,48	20,21	84,0	0,28	2	31,6	1,6	дренированный
5	Глина полутвердая	11,72	12,04	42,0	0,25	51	15,2	0	недренированный

Численный анализ устойчивости насыпи был выполнен поочередно в программных комплексах Plaxis 2D, ZSoil, Geo 5 FEM. Рас-

четная схема моделируемой насыпи изображена на рисунке 2.

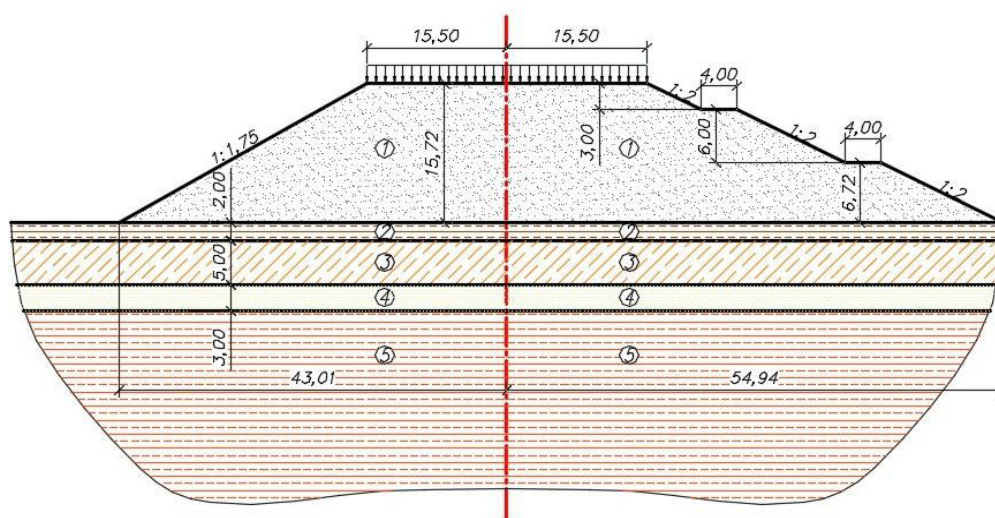


Рис. 2 – Расчетные схемы. 1-5 – номера грунтов соответствуют таблице 2

Построенная модель так же включала в себя расчетную нагрузку, распределенную в соответствии с ГОСТ Р 52748–2007 [9], после чего был выполнен численный анализ устойчивости откосов насыпи по методу снижения прочности.

Метод снижения прочности (SRM – shear reduction method). Как и в представленных методах предельного равновесия, оценка устойчивости ведется на основе коэффициента устойчивости, однако для данного метода он определяется по формуле согласно теории прочности Кулона-Мора [6]:

$$K_3 = \frac{\sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi' + c'}{\sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_r + c_r}, \quad (2)$$

где: c' и φ' – исходные параметры;

σ_n – фактическое нормальное напряжение;

c_r – параметры прочности, сниженные в ходе расчета до минимальных значений, достаточных для поддержания равновесия.

Прогноз разрушения осуществляется путем одновременного понижения обоих показателей сдвиговой прочности:

$$c_r = \frac{c}{K_3}, \quad \varphi_r = \frac{\varphi}{K_3}, \quad (3, 4)$$

где: K_3 – коэффициент снижения прочности, соответствующий коэффициенту устойчивости в момент разрушения.

Анализ устойчивости проводился для двух конструкций земляного полотна: это конструкция с бермами, изображенная с правой стороны рисунка 2 и с однородным откосом заложения 1:1,75, изображенная на рисунке 2 слева. В ходе расчета применялся расчет без применения изменяемой сетки Лагранжа.

Моделирование в программе Plaxis 2D производилось с использованием опции “stage construction” позволяющей задавать промежутки времени возведения каждого отдельного кластера насыпи, что более точно позволяет оценить процессы консолидации основания и устойчивость конструкции на всех этапах строительства. Графические результаты моделирования конструкции в программном комплексе Plaxis 2D представлены на рисунке 3. Результаты определения коэффициента устойчивости откосной части рассматриваемой насыпи сведены в таблицу 4.

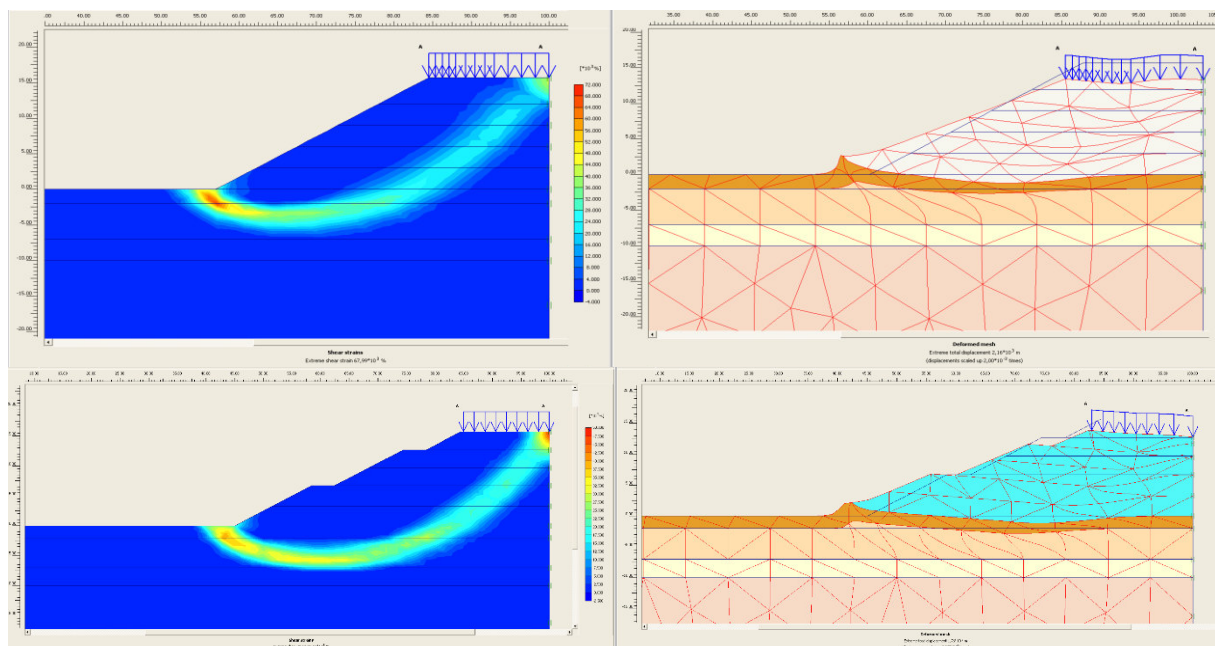


Рис. 3 – Результаты моделирования конструкций в программном комплексе Plaxis 2D
слева – изополя сдвигающих перемещений; справа – деформированная сетка конечных элементов

Оценка устойчивости насыпи в программном комплексе ZSoil выполнялась с использованием двух моделей грунта Мора-Кулона и Друкера-Прагера, являющейся более гладкой аппроксимацией его поверхности текучести. Для оценки устойчивости использовался тот же SMR метод, что и в программе Plaxis [10], графические результаты расчета представлены на рисунке 4. Результаты определения коэффициентов устойчивости сведены в таблицу 4.

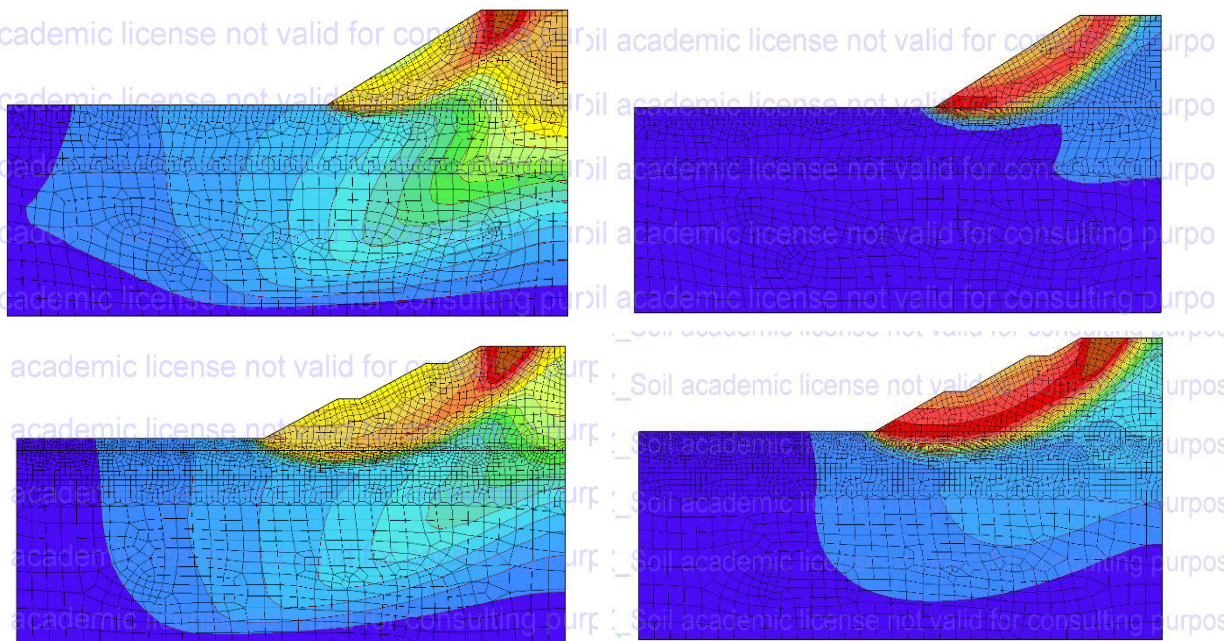


Рис. 4 – Результаты моделирования конструкций в программном комплексе ZSoil
слева – изополя общих перемещений в модели Кулона-Мора; справа – изополя общих перемещений в модели Друкера-Прагера

Использование программного комплекса GEO-5 FEM также позволило оценить устойчивость откосных частей насыпи из золошлаковой смеси на основе двух моделей (Кулона-Мора, Друкера-Прагера). Из-за невозможности получить изополе сдвигающих или общих пе-

ремещений, в графическом виде представлены наложения изополей перемещения по осям x и z, которые представлены на рисунке 5. Данные о коэффициентах устойчивости приведены в таблице 4.

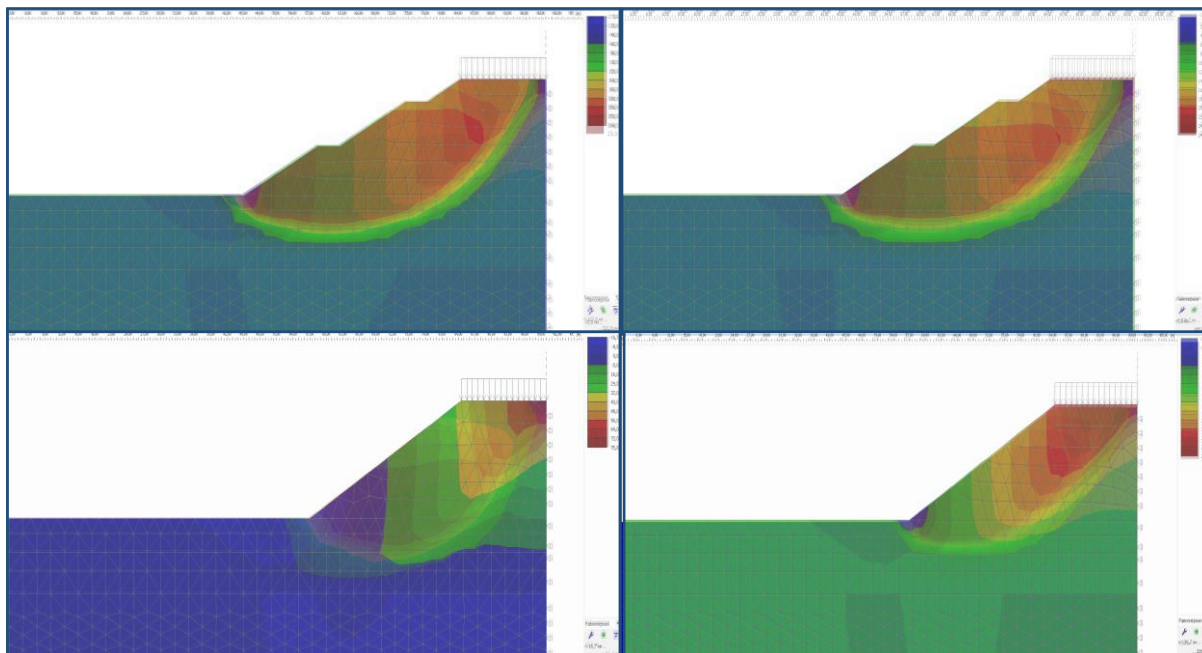


Рис. 5 – Результаты моделирования конструкций в программном комплексе GEO5 FEM
слева – изополя общих перемещений в модели Кулона-Мора; справа – изополя общих перемещений в модели Друкера-Прагера.

Таблица 3 – Используемые методы предельного равновесия

Название	Формула коэффициента устойчивости
Метод Bishop (Бишоп)	$K_3 = \frac{1}{\sum_i W_i \cdot \sin \alpha_i} \cdot \sum_i \frac{c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan \varphi_i}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \cdot \sin \alpha_i}{FS}}$
	где u_i – пластовое давление в блоке; c_i, φ_i – действительные значения параметров грунта; W_i – вес блока; α_i – угол наклона сегмента поверхности скольжения; b_i – ширина блока (в горизонтальной плоскости).
Метод Fellenius/Petterson	$K_3 = \frac{1}{\sum_i W_i \cdot \sin \alpha_i} \cdot \sum_i [c_i \cdot l_i + (N_i - u_i \cdot l_i) \tan \varphi_i]$
	где N_i – нормальная сила на сегмент поверхности скольжения;
Метод Г.М. Шахунянца	$K_3 = \frac{\sum_{i=1}^n [(P_{N_i} - U_i) \tan \varphi_i + c_i \cdot l_i + P_{Q_{i,sd}}] \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}}{\sum_{i=1}^n P_{Q_{i,ud}} \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}}$
	где: $P_{Q_{i,sd}}$ – активные силы, способствующие сползанию, $P_{Q_{i,ud}}$ – силы, удерживающие сползание блока

.Таблица 4 – Результаты комплексной оценки устойчивости

Высота насыпи и заложение откоса	Величина коэффициента запаса							
	Bishop	Fellinius	Шахунянц	Plaxis	ZSoil		GEO 5 FEM	
				M-K	M-K	D-P	M-K	D-P
15,72 (1:1.75)	1,94	1,70	1,76	1,69	1,72	1,72	1,88	2,06
15,72 (бермы)	2,31	2,05	2,06	1,98	2,10	1,95	2,26	2,48

Заключение

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- поверхности скольжения, полученные в ходе моделирования близки к круглоцилиндрическим, даже при сложной конфигурации насыпей;

- значения коэффициентов безопасности, определенные в программах Plaxis и ZSoil, сопоставимы с данными, полученными методами предельного равновесия;

- результаты моделирования в программе GEO 5 FEM, существенно отличаются от данных полученных в прочих комплексах, реализующих МКЭ;

- коэффициенты, полученные в разных программных комплексах, имеют некоторые отличия, несмотря на использование одинаковых параметров модели, и её конфигурации;

- не было замечено существенного влияния осадок основания на итоговые коэффициенты устойчивости;

В целом, проведенное сравнение устойчивости конструкций с различной конфигурацией по методам предельного равновесия и снижения прочности показали, что методы предельного равновесия, которые можно считать проверенными временем, не имеют большого расхождения с расчетами по методу снижения прочности. А, следовательно, их применение для проектирования насыпей автомобильных дорог является целесообразным.

К минусам программных продуктов, реализующих метод конечных элементов следует отнести:

- высокую сложность самостоятельного освоения программных комплексов в связи с отсутствием русскоязычного интерфейса и малым количеством литературы, описывающей принципы расчетов и алгоритмы построения моделей;

- более высокую стоимость этих программных комплексов, чем программ, реализующих более простые методы предельного равновесия;

Однако сложность освоения программ численного моделирования и их стоимость компенсируется гибкими возможностями моделирования и широким разнообразием элементов (анкеры, арматура, георешетки и т.д.), благодаря чему эти комплексы могут решать большинство задач, возникающих в практике проектирования транспортных сооружений.

Ограниченное количество литературы по этому вопросу накладывает ограничения на использование этих методов, но не является препятствием для обучения специалистов, ведь дистрибьюторы программных комплексов проводят постоянные курсы и обучающие семинары.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-48-550508 p_a). Научные исследования по теме «Название статьи» выполнены за счет средств бюджета Омской области.

Библиографический список

1. Сиротюк, В.В. Золошлаковая смесь для земляного полотна / В.В. Сиротюк, А.А. Лунев, Е.В. Иванов // Автомобильные дороги. – 2016. - № 6 (1015). –С.72-79.
2. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85 – введ. 2013-07-01. - М.: Госстрой России, 2013. – 98 с.
3. Сиротюк, В.В. Обоснование устойчивости откосов высоких насыпей из золошлаковых смесей [Электронный ресурс] / В.В. Сиротюк, А.А. Лунев, Е.В. Иванов, Г.М. Левашов // Техника и технологии строительства / СибАДИ - Омск : СибАДИ, 2016 - Вып. 1 (5). - С. 76-82. – Режим доступа : <http://bek.sibadi.org/fulltext/esd133.pdf>. - Дата обращения : 25.05.2016 г.
4. ВСН 04-71. Указания по расчету устойчивости земляных откосов [Электронный ресурс] / Минэнерго СССР. - 2-е изд-е. – Введен 1971-11-01// ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – Версия 6.4.0.200.
5. ОДМ 218.2.027–2012. Методические рекомендации по расчету и проектированию армогрунтовых подпорных стен на автомобильных дорогах [Электронный ресурс]. – Введен 2012-30-11 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». – Версия 6.4.0.200.
6. Федоренко, Е.В. Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных

характеристик / Е.В. Федоренко // Транспорт Российской Федерации. - 2013. - № 6 (49) - С. 24-26.

7. Строкова, Л.А. Применение метода конечных элементов в механике грунтов : учебное пособие / Л.А. Строкова ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 143 с.

8. Строкова, Л.А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов [Электронный ресурс] // Известия ТПУ. - 2008. - Т. 313, № 1. – Режим доступа : <http://izvestiya.tpu.ru/ru/archive/old/article.html?id=188044&journalId=176237>. – Дата обращения: 26.05.2016 г.

9. ГОСТ Р 52748–2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчётные схемы нагружения и габариты приближения. [Электронный ресурс]. – Введен 2008-01-01 // ИСС «Техэксперт» / ЗАО «Кодекс». - Версия 6.4.0.200.

10. ZSoil. PC 2012 manual / [A. Truty и др.] ; Zace Services Ltd, Software engineering. – Lausanne, Switzerland. : Elmepress International. – 2013. – 181.

COMPARISON OF METHODS FOR EVALUATING OF SLOPE STABILITY ON HIGH EMBANKMENT BUILT WITH THE USE OF BOTTOM ASH

A.A. Lunev¹ V.V. Sirotyuk¹ N.S. Bezdlov²

Abstract. The article discusses the possibility of using the software complexes, which laid the basis for the finite element method (ZSoil, Plaxis, GEO5 FEM), to evaluate the stability of the sloping parts of embankments roads built with the use of bottom ash. The paper presents the results of numerical simulation and assessment of the stability of the sloping part of the road embankment on the 1B category highway with a height of 15 m built with the use of bottom ash from Kashira's TPP-4. In conclusion, it was a comparison with the results of assessment of the overall sustainability of the same constructions for widely used in the practice of construction techniques limit equilibrium (Bishop, Fellenius, Shahunyan).

Keywords: finite element method, shear reduction method, evaluation of slope stability, coal ash and slag mixtures.

References

1. Sirotyuk, V. V. Ash-and-slag mixture for subgrade / V. V. Sirotyuk, A. A Lunev, E. V. Ivanov // the road. – 2016. - № 6 (1015). –P. 72-79.

2. SP 34.13330.2012. Road. The updated edition of SNiP 2.05.02-85–]. 2013-07-01. - М. : Gosstroy Of Russia, 2013. – 98 p.

3. Sirotyuk, V.V. Substantiation of stability of slopes of high embankments of slag mixtures [Electronic resource] / V.V. Sirotyuk, A.A. Lunev, E.V. Ivanov, G. M. Levashov // techniques and technologies of construction / SibADI - Omsk : SibADI, 2016 - Vol. 1 (5). - S. 76-82. – Mode of access :

<http://bek.sibadi.org/fulltext/esd133.pdf>. - Date of access : 25.05.2016 G.

4. BCH 04-71. Guidance on calculation of stability of earth slopes [Electronic resource] / USSR Ministry of energy. - 2nd ed-E. – Entered 1971-11-01// ISS "techexpert" / ZAO "Kodeks". Version 6.4.0.200.

5. ODM 218.2.027–2012. Methodical recommendations on calculation and design of Armagrandi under-pornih walls on highways [Electronic resource]. – Introduced 2012-30-11 // ISS "techexpert" / ZAO "Kodeks". Version 6.4.0.200.

6. Fedorenko, E.V. the Method of calculation of stability by reducing the strength characteristics / E.V. Fedorenko // Transport of the Russian Federation. - 2013. - № 6 (49) - S. 24-26.

7. Strokov, L.A. Use of the finite element method in soil mechanics : study guide / L.A. Strokov ; Tomsk Polytechnic University. – Tomsk : Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2010. – 143 p.

8. Strokov, L.A. Definition of parameters for numerical simulation of behavior of soils [Electronic resource] // news of TPU. - 2008. Vol 313, No. 1. – Mode of access : <http://izvestiya.tpu.ru/ru/archive/old/article.html?id=188044&journalId=176237>. – Date of access: 26.05.2016 G.

9. GOST R 52748-2007. Highway. Regulatory burden, raschetnye circuit loading and dimensions of the approximation. [Electronic resource]. – Introduced 2008-01-01 // ISS "Tekheks-Perth" / ZAO "Kodeks". Version 6.4.0.200.

10. ZSoil. PC 2012 manual / [A. Truty и др.] ; Zace Services Ltd, Software engineering. – Lausanne, Switzerland. : Elmepress International. – 2013. – 181.

Сиротюк Виктор Владимирович (Россия, Омск) – доктор техн. наук, профессор кафедры проектирование дорог ФГБОУ ВО Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (644008, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: sirvv@ya.ru).

Лунев Александр Александрович (Россия, Омск) – аспирант кафедры проектирование дорог ФГБОУ ВО Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (644008, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: lunev.al.al@gmail.com).

Безделов Никита Сергеевич (Россия, Омск) – магистрант кафедры проектирование дорог ФГБОУ ВО Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (644008, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: bezdelov89@mail.ru).

Sirotyuk Victor Vladimirovich (Russian Federation, Omsk) – Doctor of Technical Sciences, Professor of Department roads design, Head of the Department of roads design, Siberian state automobile and highway academy (644008, Omsk, Mira av., 5, e-mail: sirvv@ya.ru).

Lunev Aleksandr Aleksandrovich (Russian Federation, Omsk) – Postgraduate student of Department roads design, Siberian state automobile and

highway academy (644008, Omsk, Mira av., 5, e-mail lunev.al.al@gmail.com).

design, Siberian state automobile and highway academy (644008, Omsk, Mira av., 5, e-mail bezdelov89@mail.ru

Bezdelov Nikita Sergeevich (Russian Federation, Omsk) – Graduate student of Department roads

УДК 624.016:624.21

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ДЕРЕВОЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО БАЛОЧНОГО МОСТА

Ю.В. Немировский, А.И. Болтаев

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

Аннотация. В работе представлен общий подход к расчёту балочных пролётных строений деревожелезобетонного моста с учётом физической нелинейности и разнородности, а также реальных условий нагружения. В общем случае предполагается, что как бетонная часть, так и деревянная, представляют собой слоистые подконструкции, выполненные из различных видов бетона и пород древесины. Предложен безитерационный метод решения разрешающей системы нелинейных уравнений, который обладает существенными преимуществами по сравнению с итерационными методами. Приведены примеры расчётов, показывающие возможность значительного увеличения, как прочности, так и жёсткости конструкции за счёт комбинирования различных пород древесины в сечении. Показана важная особенность работы слоистых конструкций под нагрузкой, а именно, возможность возникновения скрытых форм разрушения, когда начальное разрушение возникает во внутренних слоях поперечного сечения.

Ключевые слова: деревожелезобетонные балочные мосты, физическая нелинейность, слоистые конструкции, предельные деформации.

Введение. Практика отечественного и зарубежного мостостроения показывает необходимость развития принципиально разных подходов при разработке проектов для различных регионов. В регионах, имеющих освоенные промышленно-хозяйственные территории, и нуждающихся в интенсивном росте зон индустриализации с возникающими при этом трудно прогнозируемыми потоками транспортных средств, проектирование мостовых сооружений должно опираться на традиционные и оригинальные решения для стальных, железобетонных и сталебетонных мостов. Применительно же к малоосвоенным, труднодоступным регионам с резким изменением климатических условий, наличием слабых грунтовых оснований и трудно прогнозируемыми потоками транспортных средств, создание автодорожных мостовых сооружений длительного пользования требует разработки иных подходов. Основной упор здесь должен быть сделан на использование местных или близко доступных сырьевых ресурсов и сборно-разборных элементов, позво-

ляющих производить монтаж сооружения на местной стройплощадке. При этом современные технологические приёмы позволяют достаточно надёжно соединять в цельную единую гибридную конструкцию материалы разной природы (асфальтобетоны, полимербетоны, металлы, дерево различных пород). Вопрос заключается в подборе параметров геометрии и свойств материалов, которые обеспечивали бы наиболее эффективные конструкции с точки зрения эксплуатационных и экономических требований.

В последнее время за рубежом и в нашей стране уделяют много внимания анализу работы и эффективности практического использования комбинированных деревожелезобетонных мостовых сооружений [1-5]. В качестве основных достоинств таких комбинированных конструкций отмечаются: наличие практически неограниченных сырьевых ресурсов, простота и гибкость технологической обработки составляющих элементов, низкая стоимость материалов, активное уравнивание взаимных достоинств и недостатков ма