

tem'yanov, V.A. Selivanov. // Beton i zhelezobeton. – 1981. - №5. – S. 7-8.

3. Krasnoshchekov, YU.V. Uchet vliyaniya sbornogo zhelezobetonного nastila pri raschete rigelej / YU.V. Krasnoshchekov, V.I. Saunin, E.V. SHilov. // Beton i zhelezobeton. – 1983. - №6. – S. 20-21.

4. Krasnoshchekov, YU.V. Raschet po deformatsiyam balochnykh konstruktsiy, sovmestno rabotayushchih s nastilom / YU.V. Krasnoshchekov, V.I. Saunin, E.V. SHilov. // Str-vo i arhitektura. Izvestiya vuzov. – 1984. - №12. – S. 5-9.

5. Kutovoj, A.F. EHksperimental'noe issledovanie raboty rigelej v sostave perekrytiya / A.F. Kutovoj. // EHksperimental'nye i teoreticheskie issledovaniya sbornykh zhelezobetonnykh konstruktsiy: Sb. nauchnykh trudov. □ M.: CNIEHPzhilishcha, 1983. □ S. 99-105.

6. Rekomendatsii po raschetu rigelej svyazevogo karkasa s uchetoм sovmestnoy raboty so sbornym nastilom. – M.: 1989. – Rezhim dostupa <http://mooml.com>

7. Semchenkov, A.S. Dejstvitel'naya rabota mnogopostotnykh plit perekrytiya v sostave zdaniya. A.S. Semchknov, A.S. Zalesov, O.V. Alekseev. // Beton i zhelezobeton. – 1993. - №4. – S. 2-3.

8. Gorachek, E. Prochnost' i zhestkost' stykovykh soedinenij panel'nykh sten (Opyt SSSR i CHSSR) / E. Gorachek, V.I. Lishak, D. Pume i dr. – M.: Strojizdat, 1980. – 192 s.

Краснощекоев Юрий Васильевич (Омск, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: kras1942@mail.ru).

Саунин Владислав Иванович (Омск, Россия) – доцент кафедры строительных конструкций ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: saunina48@mail.ru).

Krasnoshchekov Yuri Vasil'evich (Omsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of building structures, State Automobile and Highway Academy "SibADI", (644080, Mira, 5 prospect, e-mail: kras1942@mail.ru).

Saunin Vladislav Ivanovich (Omsk, Russian Federation) – Ass., Department of building structures, State Automobile and Highway Academy "SibADI", (644080, Mira, 5 prospect, e-mail: saunina48@mail.ru).

УДК 691.327.33

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕНОБЕТОНА НА КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ С ЗОЛОЙ ГИДРОУДАЛЕНИЯ

И.Н. Кузнецова, М.А. Ращупкина

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия «СибАДИ», Россия, г. Омск.

Аннотация. В данной статье предпринята попытка представить усовершенствованный способ производства пенобетона. Усовершенствованная технология производства пенобетона на композиционном вяжущем с содержанием высокодисперсных частиц золы гидроудаления, полученных путем измельчения частиц золы, позволяет производить конструкционно-теплоизоляционный материал, используя отходы производства ТЭЦ. Представлены и обоснованы полученные результаты теплофизических и механических свойств золы как высокодисперсной добавки и пенобетонных образцов.

Ключевые слова: пенобетон, зола, технология производства пенобетона, свойства.

Введение

Возможность целенаправленно изменять процесс структурообразования, твердения пенобетона является ценным в технологии производства строительных материалов. Частицы твердой фазы композиционного вяжущего являются наночастицами, из которых формируется различная структура пенобетона. Управлять данной структурой в начальные сроки твердения возможно за счет избыточной поверхностной энергии, которая про-

является в виде внутренних сил дисперсной или дисперсно-зернистой системы и участвует в структурообразовании фаз. На начальном этапе исследований пенобетона определены его основные функции как композиционного материала, состоящего из вяжущего, высокодисперсной минеральной добавки (золы гидроудаления), пенообразователя, песка и воды.

Оценку структурообразования неорганических соединений цементного камня и пено-

бетона в целом необходимо вести комплексно, учитывая кристаллохимические особенности веществ, кинетические и термодинамические факторы.

Цементный камень является основным компонентом перегородок в пенобетоне, определяющим его свойства, по которым проходит основной тепловой поток Q от наружной грани строительного материала к его внутренней грани. Свойства цементного камня определяются гидратацией цемента, а практическая ценность портландцемента определяется в результате химических и физико-химических превращений, которые способны создать прочный камень. [1-3].

Основная часть. Усовершенствованная технология производства пенобетона.

В настоящее время проводятся исследования в научном и практическом плане о связи межфазных взаимодействий и внутренних сил с распределением по крупности частиц, входящих в структуру пенобетона, составляющую из частиц с крупностью $10 \div 0,1$ мкм.

При получении пенобетонов на тонкозернистом композиционном вяжущем важны удельная поверхность высокодисперсного заполнителя, влияющая на водопотребность бетонной смеси, и площадь сцепления зёрен заполнителя с цементной матрицей, где удельная поверхность дисперсной фазы вычисляется по формуле

$$S_{y\partial} = \frac{S_q}{V_q},$$

где S_q – поверхность частицы; V_q – её объём.

Удельные поверхности применяемой высокодисперсной золы составляют $S_{y\partial}=170-200$ кг/м³ и $S_{y\partial}=600-650$ кг/м³, а песка варьируется в пределах от 1,97 до 15,83 м²/г при пустотности в уплотнённом состоянии от 28,8 до 37,5%.

Использование золы гидроудаления омских ТЭЦ с ультрадисперсным зерновым составом в качестве добавки при производстве пенобетонов является успешным за счет стабильности их физико-химических показателей, способности проявлять пуццолановую активность, способности при обычных температурах связывать гидроксид кальция с образованием нерастворимых соединений.

Измельчение способствует повышению значения полной свободной поверхностной энергии золы U_F , которая зависит от энергии Гиббса (единицы поверхности) и скрытой те-

плоты образования единицы новой поверхности:

$$U_F = \sigma + q_F = G_F + T \cdot S_F,$$

где σ – удельная свободная поверхностная энергия, $\sigma = dG/dF$; F – площадь поверхности; G_F – энергия Гиббса (единицы поверхности); q_F – скрытая теплота образования единицы новой поверхности; $q_F = T \cdot S_F$; S_F – избыточная энтропия единицы поверхности; T – температура. [4, 5, 6].

Процесс твердения для придания цементному камню (межпоровому материалу) высокой прочности происходит, вследствие проявления водородных связей, вандерваальсового взаимодействия или ионного притяжения при наличии неуравновешенных электрических зарядов. Данные силы структурной связи могут проявляться в том случае, если частички сближены до расстояний, на которых между ними возникают короткодействующие ненасыщенные поверхностные валентные силы [1, 6]. С увеличением времени помола удельная поверхность материалов повышается, при этом рост концентрации активных центров замедляется. При механоактивации происходит нарушение контактов между кристаллами с разрывом кремнекислородных валентных связей.

В научных работах А.Г. Колмакова, М.И. Алымова, Б.М. Балояна, гидраты представлены в виде мельчайших частиц – субмикрорекристаллов – с размерами меньше 0,1 мкм; они создают в прослойках между гидратированными зёрнами цемента коллоидную систему – тоберморитовый гель. Между частицами возникают коагуляционные контакты, что и приводит к образованию коагуляционной структуры. Особенностью этих контактов является обязательное наличие между частицами тонкой устойчивой прослойки воды (дисперсионной среды). [6, 7].

В результате физических контактов коагуляционной структуры цементного геля происходит облегченность миграции атомов, наблюдаются более выраженные силы притяжения между атомами, что приводит к склонности самоорганизации кластерных структур.

Для получения высокодисперсных частиц на основе золы использовали центробежную дисковую установку, которая по степени дисперсности при сухом помоле позволяет получать ультрадисперсные материалы – 10^2-10^3

нм, Центробежная дисковая установка представлена в работе [8] и состоит из цилиндрического корпуса 1, в котором установлен вал 4 с лопастями 5, вал закреплен в корпусе с помощью подшипников 3, закрытых внешними втулками для предотвращения оттока обрабатываемого продукта. Вал 2 соединяется с помощью клиноременной передачи со шток-ом электродвигателя соответствующей мощности.

Энергозатраты на помол минеральных материалов весьма значительны, поэтому определены рациональные значения удельной поверхности наполнителя, выше которой активность его поверхности возрастает незначительно. Для золы гидроудаления с $S_{уд}=600 - 650 \text{ кг/м}^3$ активность практически максимальна.

С технологической точки зрения применение интенсивного механического воздействия

на компоненты пенобетона оправдано, так как при механоактивации золы повышается её пуццолановая активность, тем самым значительно повышается её структурообразующая роль.

На приборе лазерного анализатора «MicroSizer 201» был проведен анализ содержания ультрадисперсных частиц золы гидроудаления, полученных в результате активации. Полученные результаты весового распределения частиц зол гидроудаления до и после активации показывают, что количество ультрадисперсных частиц золы гидроудаления размером от 550–1100 нм составляет 15–18%. Микрофотографии частиц молотой золы гидроудаления выполнены с помощью электронной растровой микроскопии на микроскопе РЭМ 100У с разрешением 500 мкм и представлены на рисунке 1.

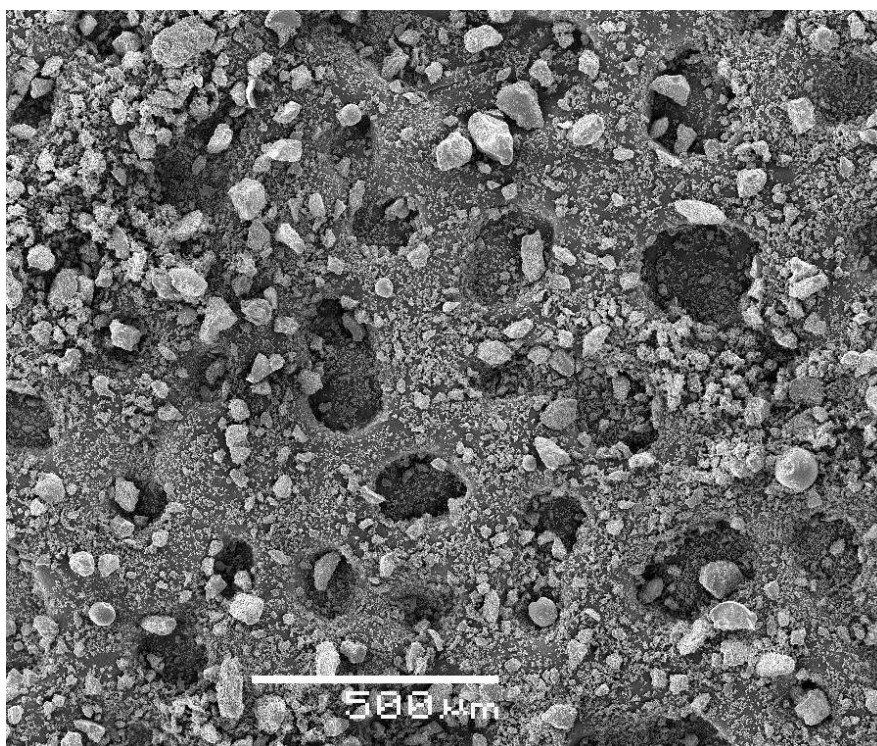


Рис.1. Частицы молотой золы гидроудаления с $S_{уд}=600 - 650 \text{ м}^2/\text{кг}$ с разрешением 500 мкм

При изготовлении образцов пенобетона использовались следующие материалы:

1. Вяжущее – портландцемент ЦЕМ II /А-Ш 42,5Н Искитимского цементного завода.

2. Песок гидронамывной с реки Иртыша, $M_k=1,9-2,1$; истинная плотность 2635 кг/м^3 ;

3. Зола гидроудаления влажностью 55% , насыпной плотностью 800 кг/м^3 , удельными поверхностями $S_{уд}=170-200 \text{ кг/м}^3$ и $S_{уд}=600-$

650 кг/м^3 , коэффициент теплопроводности в воздушно-сухом состоянии $0,127 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$, плотность естественного сложения в золоотвале 1400 кг/м^3 .

4. Пенообразователь ПБ-Люкс (пена отдельно приготовленная: $H_p - 9,8$, кратность пены – 10, устойчивость - 7%).

5. Вода водопроводная.

Последовательность процессов технологической схемы приготовления растворной смеси для производства пенобетона:

1. Зола дозируется и поступает в центробежную дисковую установку для помола.

2. Зола, песок и цемент дозируются, перемешиваются и пневмотранспортом подаются в расходный бункер.

3. Пенообразователь и вода с температурой 20-25°C дозируются и поступают в пеногенератор, в котором в течение 5–6 минут взбивается пена.

4. Готовая техническая пена подается в смеситель СМС-40 и перемешивается с раствором (цементно-песчано-золяная смесь) еще в течение 3–4 минут.

5. Готовая пеномасса разливается в формы, после чего производится предварительная выдержка смеси в течение 3–4 часов при температуре 20 °С.

6. Образцы выдерживались при температуре 20±2 °С и относительной влажности 55% 28 суток нормального твердения.

Представленная технология изготовления пенобетона с применением механоактивированной золы позволяет создать замкнутую

структуру пор с определенным средним диаметром и примерно одинаковыми по сечению межпоровыми перегородками. Оптимальная структура пенобетона определена на основании математических моделей предложенных Г.И. Логиновым и А.П. Филиным, которая характеризует заполняемость единицы объема шарообразными телами, более подробно изложена модель в работе [9].

Объем пор в пенобетоне, который формируется технологическим путем, определяется по формуле [6]

$$V_e = [1 - \rho_{cp} \cdot (0,34 + B/T)]/1,1,$$

где ρ_{cp} – средняя плотность пенобетона, кг/л; B/T – отношение объема воды затворения к массе твердых веществ, т.е. к массе портландцемента.

Физико-технические показатели пенобетона определялись согласно требованиям ГОСТа, в возрасте 28 суток нормального твердения, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1- Физико-технические показатели образцов пенобетона

Показатель	Контрольный образец без золы	Удельная поверхность золы			
		$S_{уд}=170-200 \text{ кг/м}^3$		$S_{уд}=600-650 \text{ кг/м}^3$	
		Количество высокодисперсной золы гидроудаления			
		10%	30%	10%	30%
	$R_{сж}$	$R_{сж}$	$R_{сж}$	$R_{сж}$	$R_{сж}$
Номер образца	-	№1	№2	№3	№4
Прочность на сжатие $R_{сж}$, Мпа	3,5	3,4	3,1	3,6	3,2
Средняя плотность, кг/м ³	658-702	705	695	720	670
Средняя теплопроводность $\lambda_{пен}$, Вт/(м·К)	0,220	0,170	0,186	0,191	0,183
Морозостойкость, цикл	35	35	35	35	35
Водопоглощение, % по массе	14	14	14	14	14

Для определения содержания пор в пенобетонных образцах использовали метод ртутной порометрии и анализатор «Porosimeter 2000». Данный прибор позволил измерить широкий интервал размеров пор (мезо- и макропор), общий объем пор в

пенобетонных образцах составил 0,759 см³/г при диаметре пор от 0,054·10⁻³ до 0,02·10⁻³ м.

Рентгеновским дифрактометром «Bruker D8 ADVANCE» был определен минеральный состав пенобетонных образцов: минералы CaCO₃; Ca(OH)₂; Ca₂SiO₄; SiO₂; 3CaO·SiO₂.

Наличие продуктов гидратации установлено по пикам с $d, \cdot 10^{-10} = 4,92; 2,63; 2,45; 1,48; 1,45; 9,8; [Ca(OH)_2 \text{ и } Ca_2SiO_4 \cdot xH_2O] \text{ и } d, \cdot 10^{-10} = 3,87; 3,04; 2,05; 1,92 [CaCO_3]$. Содержание Ca_2SiO_4 устанавливается по линиям $d, \cdot 10^{-10} = 2,77; 2,18; 1,97$.

На термограмме образца пенобетона (дифференциальном термическом анализаторе DTG-60, SHIMADZU) симметричность пиков однородна на всех участках кривых DSC и DTG, что характеризует однородность состава образца. Интегральная общая потеря массы составляет 10,65%.

Заключение

Применение высокодисперсной золы обеспечивает прочность на сжатие, намного превышающую прочность обычных пенобетонов, а низкая проницаемость и повышенная плотность межпоровых перегородок в пенобетоне обеспечивает повышенную его морозостойкость. Применение золы гидроудаления в качестве высокодисперсной минеральной добавки в пенобетоне позволяет экономить от 10 до 15% цемента.

Физико-технические свойства пенобетона показали, что марка пенобетона по средней плотности – D700; средняя теплопроводность $\lambda_{пен} = 0,183 \text{ Вт/(м·К)}$; паропроницаемость – $0,17 \text{ кг/(м ч Па)}$; сорбционная влажность – не более 7–9% при относительной влажности 75%, класс по прочности на сжатие – В35, марка по морозостойкости – от F30.

Оптимальное содержание высокодисперсной золы гидроудаления составляет 10%, т.к. дальнейшее увеличение является нецелесообразным вследствие того, что снижаются прочностные показатели пенобетона (более чем на 5%), а теплопроводность уменьшается на 3%. Использование пенобетона на композиционном вяжущем с содержанием высокодисперсных частиц золы гидроудаления позволяет экономить цемент от 10 до 15% без снижения прочностных характеристик ячеистых бетонов и улучшать теплофизические свойства до 10%.

В сравнении с прочностью ячеистого бетона в 28-суточном возрасте прочность неавтоклавного пенобетона через 2 месяца твердения увеличивается в 1,4 раза, по истечении года прочность увеличилась более чем в 2 раза. Исследования теплопроводности показали, что она на протяжении такого же времени осталась в средних пределах от 0,283 до 0,293 Вт/(м·К).

Библиографический список

1. Формирование структуры композиционных материалов и их свойства / Б.В. Гусев [и др.]. – М. : Научный мир, 2006. – 560 с.
2. Влияние минерального состава и пористой структуры межпоровых перегородок на теплопроводность пенобетона / И.Н. Кузнецова, О.А. Кузнецов, А.Ф. Косач, М.А. Рашупкина // Известия вузов. Строительство. – 2010. – № 6. – С. 24-27.
3. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения : учебное пособие / Б.М. Балоян, А.Г. Колмаков, М.И. Алымов, А.М. Кротов. - М., 2007. – 125 с.
4. Ахведов, И.Н. Основы физики бетона : учебник для вузов / И.Н. Ахведов. – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.
5. Шмитько, Е.И. Химия цемента и вяжущих веществ : учебное пособие / Е.И. Шмитько, А.В. Крылова, В.В. Шаталова. - СПб.: Проспект Науки, 2006. – 206 с.
6. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин ; под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина – 5-е изд., пересм. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
7. Гусев, Б.В. Прочность полидисперсного композиционного материала, типа цементного бетона и особенности напряженно-деформированного состояния такого материала при действии сжимающих нагрузок / Б.В. Гусев. – М. : ЦИСН, 2003. – 37 с.
8. Кузнецова, И.Н. Технология пенобетона на основе торфа / И.Н. Кузнецова, М.А. Рашупкина, С.В. Жуков // Вестник СибАДИ. – 2014. – № 4 (38). – С. 72–77.
9. Влияние основных минералов цементного камня на его структуру и свойства / И.Н. Кузнецова, А.Ф. Косач, М.А. Рашупкина, Н.А. Гутарева // Известия вузов. Строительство. – 2015. – № 8 (680). – С. 25–33.

TECHNOLOGY OF FOAM CONCRETE ON COMPOSITE KNITTING WITH HYDROREMOVAL ASHES

I.N. Kuznetsova, M.A. Raschupkina

Abstract. In this article an attempt to provide an advanced method of production of foam concrete is made. The advanced production technology of foam concrete on composite knitting with content of the high-disperse particles of ashes of hydroremoval received by crushing of particles of ashes allows to make constructional and heat-insulating material, using production wastes TEC. The received results of heatphysical and mechanical properties of ashes as high-disperse additive and foam concrete samples are provided and proved.

Keywords: foam concrete, ashes, production technology of foam concrete, property.

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