

DOI 10.15593/2409-5125/2015.04.04

УДК 624.137.5

**К.А. Миллер**

ОАО «НЬЮ ГРАУНД»

**О.А. Маковецкий**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет

## **АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО БАРЬЕРА, ВЫПОЛНЕННОГО ИЗ ГРУНТОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Применение технологии струйной цементации грунта для устройства вертикальных геотехнических барьеров широко распространено в настоящее время. Расположение грунтоцементных элементов в плане может быть одно- и многорядное, в соприкасающемся или секущемся варианте. Выбор того или иного решения зависит от конкретных инженерно-геологических условий площадки. Проектирование геотехнического барьера, выполненного из грунтоцементных элементов, сводится к расчету прочности и оценке надежности конструкции. Принципы проектирования конструкций из грунтобетона основываются на теории железобетона и экспериментальных данных по испытанию образцов материалов. В статье рассматривается методика определения приведенных характеристик сечений армированных грунтобетонных элементов и расчета предельной несущей способности ограждающей конструкции геотехнического барьера. Приведены зависимости определения эффективных деформационных характеристик на основе модели однонаправленного композита. При стандартном варианте решения данной задачи учитывается плоская картина деформаций и жесткость конструкции для стандартного приведенного сечения шириной 1 м. Использование пространственной жесткости конструкции и рассмотрение стенок котлована как пластины, закрепленной по трем сторонам: упругоподатливое закрепление в основании и достаточно жесткое закрепление по торцам, позволит оценить работу геотехнического барьера наиболее близко к реальности.

**Ключевые слова:** геотехнический барьер, грунтоцементные элементы, приведенные характеристики, сжатая зона, арматура.

Устойчивость стенок глубоких котлованов обеспечивается созданием геотехнических барьеров, в частности с применением технологии струйной цементации грунта. Расположение грунтоцементных элементов в плане может быть одно- и многорядное, в соприкасающемся или секущемся варианте. Выбор того или

иною решения зависит от конкретных инженерно-геологических условий площадки [3, 6, 8].

Проектирование геотехнического барьера, выполненного из грунтоцементных элементов, сводится к расчету прочности и оценке надежности конструкции. Расчет на прочность в свою очередь включает в себя определение максимального изгибающего момента, по которому вычисляются напряжения, возникающие в грунтоцементном элементе [4, 5, 7].

Порядок проектирования ограждения, выполненного из грунтобетонных элементов, рассматривался рядом авторов [2, 10–12, 15].

При решении задачи о напряженно-деформированном состоянии геотехнического барьера полагаем:

- грунтобетон не сопротивляется растяжению [13, 14];
- выполняется гипотеза плоских сечений.

Отсюда следует, что ограждение, образованное секущимися грунтоцементными элементами и армированное только в вертикальном направлении, при действии грунтового давления сопротивляется изгибу в направлении армирования  $y$  и работает в направлении  $x$  только на срез [9].

В настоящей статье изложена методика расчета приведенных характеристик сечений армированных грунтоцементных элементов для расчета предельной несущей способности ограждающей конструкции геотехнического барьера, выполненного по технологии струйной цементации грунта.

Ограждение котлована подземного сооружения образовано секущимися грунтоцементными сваями (рис. 1). Сваи изготавливаются по технологии струйной цементации грунта и армируются по оси полыми стальными стержнями (трубой).

Высота стенки (длина сваи)  $l$ , ширина стенки  $b$ , диаметр сваи  $D$ , диаметр армирующего стержня  $d$ . На стенку действует нагрузка  $q$  от давления грунта.

Расчет изгибной жесткости  $D_y$  пластинки начинается с расчета приведенной жесткости  $(EI)_{\text{прив}}$  для балки-сваи. Затем полученное значение делится на период армирования  $S$ :

$$D_y^{\text{прив}} = \frac{(EI)_{\text{прив}}}{S}, \quad (1)$$

где  $S$  – период армирования по оси  $x$  (см. рис. 1).

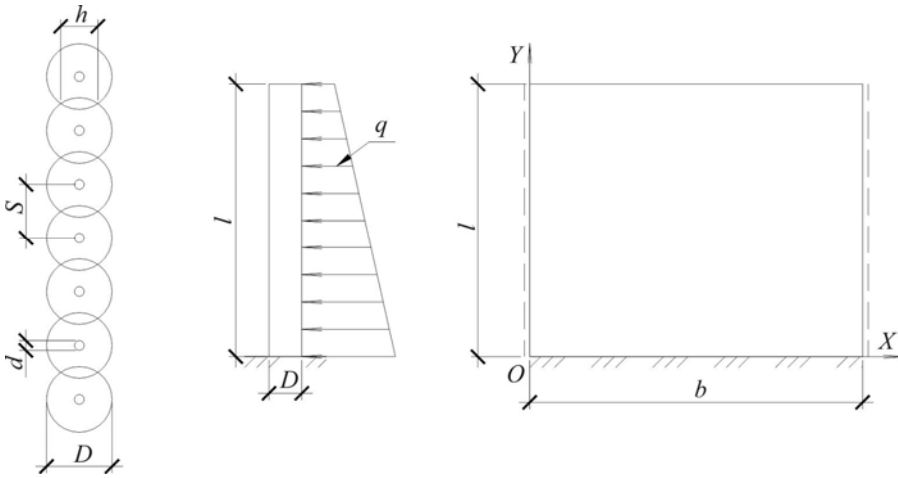


Рис. 1. Схема ограждающей конструкции котлована, выполненной из армированных грунтоцементных элементов

Приведенные характеристики рассчитываются для случая чистого изгиба согласно гипотезе плоских сечений, затем полученные результаты распространяются на поперечный изгиб.

Для расчета армированных грунтобетонных элементов воспользуемся методикой расчета железобетонных конструкций.

При выводе формул, определяющих приведенные характеристики железобетонных сечений, считается, что работа элементов арматуры и сжатой зоны бетона происходит в линейно-упругой стадии, при этом сопротивление растянутой зоны бетона не учитывается.

При чистом изгибе поперечные сечения балки остаются плоскими, независимо от того, состоит ли балка из одного материала или из нескольких различных материалов, и деформации изменяются от верхней поверхности до нижней по линейному закону. Нормальные напряжения изгиба  $\sigma$  на произвольном расстоянии  $z$  от нейтральной оси, имеющей кривизну  $1/\rho$ :

$$\sigma_s = \frac{E_s \cdot z}{\rho}; \quad \sigma_{gb} = \frac{E_{gb} \cdot z}{\rho}, \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  и  $\sigma_{gb}$  – нормальные напряжения в арматуре и грунтобетоне соответственно;  $E_s$  и  $E_{gb}$  – модули упругости арматуры и грунтобетона.

Положение нейтральной оси находится из условия, что суммарная осевая сила при чистом изгибе равна нулю:

$$\int_{A_s} \sigma_s dA + \int_{A_{gb}} \sigma_{gb} dA = 0 \Rightarrow E_s \int_{A_s} z dA + E_{gb} \int_{A_{gb}} z dA = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_s S_s + E_{gb} S_{gb} = 0, \quad (3)$$

здесь  $A_s, A_{gb}$  – площади сечений арматуры и сжатой зоны грунтобетона соответственно;  $S_s, S_{gb}$  – статические моменты арматуры и сжатой зоны грунтобетона относительно нейтральной оси.

Решаем уравнение (3) относительно высоты  $H$  сжатой зоны бетона. Зная  $H$ , можно вычислить приведенный момент инерции сечения относительно нейтральной оси сечения сваи:

$$(EI)_{\text{прив}} = E_{gb} (I_{gb} + nI_s);$$

$$n = \frac{E_s}{E_{gb}}, \quad (4)$$

здесь  $I_s, I_{gb}$  – моменты инерции арматуры и сжатой зоны грунтобетона относительно нейтральной оси.

Далее, определив приведенную цилиндрическую жесткость  $D_y^{\text{прив}}$  по формуле (1), найдем предельную несущую способность сечения ограждающей конструкции при действии в сечении поперечного изгибающего момента  $M$  из условий:

$$\sigma_{gb} = E_{gb} \frac{Mz_{gb}^{\max}}{D_y^{\text{прив}}} \leq R_{gb}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{gb}$  – напряжение в грунтобетоне;  $E_{gb}$  – модуль упругости грунтобетона;  $D_y^{\text{прив}}$  – приведенная изгибная жесткость сечения;  $z_{gb}^{\max}$  – расстояние от нейтральной оси до границы сечения элемента;  $M$  – максимальный действующий момент;  $R_{gb}$  – прочность грунтобетона на растяжение.

$$\sigma_s = E_s \frac{Mz_s^{\max}}{D_y^{\text{прив}}} \leq R_s, \quad (6)$$

где  $\sigma_s$  – напряжение в арматуре;  $E_s$  – модуль упругости арматуры;  $D_y^{\text{прив}}$  – приведенная изгибная жесткость сечения;  $z_s^{\text{max}}$  – расстояние от оси арматуры до нейтральной оси;  $M$  – максимальный действующий момент;  $R_s$  – прочность арматуры на растяжение.

В случае круглой железобетонной балки, армированной по центру стальной трубой, геометрические характеристики приведенного сечения определяются стандартными методами теории сопротивления материалов [1].



Рис. 2. Положение нейтральной оси грунтоцементного элемента

Площадь сечения  $A_{\text{сеч}} \approx \frac{2}{3} aH$ . Координаты центра тяжести сегмента:  $z_{\text{ц.т.}} \approx 0,575H$ . Момент инерции сегмента при  $H = D/2$  относительно главной центральной оси  $x$ :  $I_x \approx 0,0066D^4$ . Площадь сечения тонкостенного кольца  $A_k \approx \pi dS$ . Момент инерции кольца относительно центральной оси  $I_k \approx \frac{\pi \delta d^3}{8}$ .

Высота сжатой зоны бетона находится методом последовательных приближений, начиная с  $a = D$ . Уравнение (3) при этом имеет вид

$$E_{gb} \frac{2}{3} DH (H - 0,575H) - E_s \pi d \delta \left( \frac{D}{2} - H \right) = 0. \quad (7)$$

Определив  $H$ , уточняем величину  $a$ :

$$\frac{a}{2} = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - H\right)^2}. \quad (8)$$

Далее вычисляем уточненное значение  $H$ . Определив  $H$ , момент инерции сегмента с основанием  $a$  находим по справочным таблицам или номограммам.

Затем по соотношению (4) вычисляем  $(EI)_{\text{прив}}$ , учитывая при этом изменение момента инерции при параллельном переносе осей, поскольку нейтральная ось сечения не является главной центральной ни для сегмента (сжатая зона), ни для кольца (армирующая труба).

Жесткость на кручение  $D_k$  определяется по формуле (величина  $h$  см. рис. 1):

$$D_k = \frac{Gh^3}{12}. \quad (9)$$

Для определения приведенного модуля сдвига  $G$  воспользуемся формулами расчета упругих характеристик однонаправленного композита при плоском напряженном состоянии:

$$G = \frac{G_s G_{gb}}{\psi G_{gb} + (1 - \psi) G_s} = \frac{G_{gb}}{\psi \frac{G_{gb}}{G_s} + (1 - \psi)} \approx G_{gb} = \frac{E_{gb}}{2(1 + \nu_{gb})}, \quad (10)$$

здесь  $\psi$  – объемная доля арматуры;  $(1 - \psi)$  – объемная доля бетона;  $G_s, G_{gb}$  – модули сдвига арматуры и бетона соответственно.

В преобразованиях (10) учтено: малость  $\psi$ ; малость отношения  $G_{gb}/G_s$  для грунтоцементного материала.

При стандартном варианте решения данной задачи учитывается плоская картина деформаций и жесткость конструкции для стандартного приведенного сечения размером 1 м. Использование пространственной жесткости конструкции и рассмотрение стены котлована как пластины, закрепленной по трем сторонам: упругоподатливое закрепление в основании и достаточно жесткое закрепление по торцам, позволит оценить работу геотехнического барьера наиболее близко к реальности.

**Библиографический список**

1. Фесик С.П. Справочник по сопротивлению материалов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Будівельник, 1982. – 280 с.
2. Малинин А.Г., Малинин П.А., Чернопазов С.А. Методика расчета ограждающих конструкций, устроенных с применением струйной геотехнологии // Пермские строительные ведомости. – 2006. – Сентябрь. – С. 7–9.
3. Маковецкий О.А., Миллер К.А. Устройство ограждений котлованов из грунтоцементных элементов // Инновационные конструкции и технологии в фундаментостроении и геотехнике: материалы науч.-техн. конф. с международным участием. – Пермь, 2013. – С. 120–123.
4. Маковецкий О.А., Миллер К.А., Галимова В.В. Проектирование ограждений котлованов из бурсекущих грунтоцементных элементов // Галузеве машинобудування будівництво. – Вип. 3(38), т. 2. – Полтава, 2013. – С. 228–233.
5. Маковецкий О.А., Галимова В.В. Миллер К.А., Вопросы проектирования и применения геотехнического барьера, выполненного по технологии струйной цементации грунта // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2014. – № 1. – С. 99–104.
6. Бройд И.И. Струйная геотехнология. – М.: АСВ, 2004. – 448 с.
7. Пономарев А.Б. Геотехническое моделирование влияния глубокого котлована при реконструкции зданий // Жилищное строительство. – 2014. – № 9. – С. 38–44.
8. Пономарев А.Б. Реконструкция подземного пространства. – М.: АСВ, 2006. – 232 с.
9. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
10. Маковецкий О.А., Зуев С.С. Обеспечение эксплуатационной надежности подземной части комплексов жилых зданий // Жилищное строительство. – 2012. – № 9. – С. 38–41.
11. Маковецкий О.А., Зуев С.С., Хусаинов И.И. Применение струйной цементации для устройства подземных частей комплексов // Жилищное строительство. – 2013. – № 9. – С. 10–14.
12. Khusainov I., Kashevarova G.G., Makovetsky O. Experience in Application of JET Grouting for Installation of Substructures of Estates // *Frontiers in Geotechnical Engineering (FGE)*. – 2013. – Vol. 2, iss. 2.
13. Черняков А.В. Оценка долговечности грунтобетона в струйной технологии // Строительные материалы. – 2011. – № 10. – С. 37–39.
14. Богов С.Г. Закрепление грунта по струйной технологии для реконструкции зданий // Жилищное строительство. – 2014. – № 9. – С. 51–55.
15. Ильичев В.А., Готман Ю.А. Расчет грунтоцементного массива для снижения перемещений методом оптимального проектирования // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2011. – № 4. – С. 24–31.

**References**

1. Fesik S.P. Spravochnik po soprotivleniu materialov [Handbook on strength of materials]. Kiev: Budivel'nik, 1982. 280 p.
2. Malinin A.G., Malinin P.A., Chernopazov S.A. Metodika rashcheta ograzhdayushchikh konstruksij, ustroennykh s primeneniem strujnoj geotekhnologii [The method of

calculation of protecting designs, arranged with the use of jet Geotechnology]. *Permskie stroitel'nye vedomosti*, 2006, September, pp. 7–9.

3. Makovetskij O.A., Miller K.A. Ustrojstvo ograzhdenij kotlovanov iz grunto-tsementnykh elementov [The fencing of pits from jet-grouting piles]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Innovatsionnye konstruksii i tekhnologii v fundamentostroenii i geotekhnike»*. Perm, 2013, pp. 120–123.

4. Makovetskij O.A., Miller K.A., Galimova V.V. Proektirovanie ograzhdenij kotlovanov iz burosekushchikh grunto-tsementnykh elementov [The design of the fencing of pits from jet elements]. *Galuzeve mashinobuduvannja budivnictvo*. Poltava, 2013, vip. 3(38), vol. 2, pp. 228–233.

5. Makovetskij O.A., Galimova V.V., Miller K.A. Voprosy proektirovaniya i primeneniya geotekhnicheskogo baryera, vypolnennogo po tekhnologii strujnoj tsementatsii grunta [The design and application of geotechnical barrier from jet grouting piles]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*, 2014, no. 1, pp. 99–104.

6. Brojd I.I. Strujnaya tekhnologiya [Jet-grouting]. Moscow: ASV, 2004. 448 p.

7. Ponomarev A.B. Geotekhnicheskoe modelirovanie vliyaniya glubokogo kotlovana pri rekonstruktsii zdaniy [Geotechnical modeling in influence of a dee ditch at reconstruction of the building]. *Zhilishchnoe stroitelstvo*, 2014, no. 9, pp. 38–44.

8. Ponomarev A.B. Rekonstruktsiya podzemnogo prostranstva [Reconstruction of underground space]. Moscow: ASV, 2006. 232 p.

9. Karpenko N.I. Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of mechanics of reinforced concrete]. Moscow: Strojizdat, 1996. 416 p.

10. Makovetskij O.A., Zuev S.S. Obespechenie ekspluatatsionnoj nadegnosti podzemnoj chasti kompleksov zhilykh zdaniy [Control of operational reliability of underground part of residential building complex]. *Zhilishchnoe stroitelstvo*, 2012, no. 9, pp. 38–41.

11. Makovetskij O.A., Zuev S.S., Khusainov I.I. Primenenie strujnoj tsementatsii dlya ustrojstva podzemnykh chastej kompleksov [The use of jet grouting for construction of underground parts of complexes.] *Zhilishchnoe stroitelstvo*, 2013, no. 9, pp. 10–14.

12. Khusainov I., Kashevarova G.G., Makovetsky O. Experience in Application of JET Grouting for Installation of Substructures of Estates. *Frontiers in Geotechnical Engineering (FGE)*, 2013, vol. 2, iss. 2, pp.

13. Chernyakov A.V. Otsenka dolgovechnosti gruntobetona v strujnoj tekhnologii [Evaluation of durability of soil-concrete in jet-technology]. *Stroitelnye materialy*, 2011, no. 10, pp. 37–39.

14. Bogov S.G. Zakreplenie grunta po strujnoj tekhnologii dlya rekonstruktsii zdaniy [Soil Consolidation with the Use of Jet Grouting for Reconstruction]. *Zhilishchnoe stroitelstvo*, 2014, no. 9, pp. 51–55.

15. Ilichev V.A., Gotman U.A. Raschet grunto-tsementnogo massiva dlya snizheniya peremeshchenij metodom optimalnogo proektirovaniya [Variant design of using the jet-grouting technology for reduction the settlements of the existing buildings while construction an underground complex]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2011, no. 4, pp. 24–31.

**Получено 30.10.2015**



---

**K. Miller, O. Makovetskij**

**DETERMINATION OF ULTIMATE LOAD ABILITY  
OF SECTIONS OF FENCING CONSTRUCTION  
GEOTECHNICAL BARRIERS EXECUTION  
OF GROUTING ELEMENTS**

The use of technology jet grouting soil for the device of vertical geotechnical barriers widespread currently. The arrangement of jet elements in the plan may be single – or multi-row, contiguous or split version. The choice of the solution depends on specific geological conditions of the site. The design of the geotechnical barrier, made of jet elements, is reduced to the calculation of strength and reliability assessment of the structure. Principles of structural design of purpose based on the theory of reinforced concrete and experimental data on testing of samples of materials. This article discusses the method of determining the above characteristics of cross-sections of reinforced jet-grouting elements and calculation of the ultimate bearing capacity of the building envelope design of geotechnical barrier. The dependences determine the effective deformation characteristics based on the model of unidirectional composite. When standard solution of this problem was considered flat pattern deformations and rigidity are accounted for given standard cross-section width of 1m. The use of spatial rigidity and consideration of the wall of the pit as plate fixed on three sides: elastic – pliable fastening at the base and fairly rigid clamping at the ends – will allow to evaluate the work GB is the most close to reality.

**Keywords:** geotechnical barrier grouting elements listed characteristics, the compressed zone valves.

*Миллер Каролина Альбертовна (Россия, Пермь) – инженер ОАО «НБЮ ГРАУНД» (614000, г. Пермь, ул. Кронштадтская, 35, e-mail: umka711@mail.ru).*

*Маковецкий Олег Александрович (Россия, Пермь) – канд. техн. наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: omakovetskiy@gmail.com).*

*Miller Karolina (Perm, Russian Federation) – Engineer, “NEW GROUND” (614000, Perm, Kronshtadtskaya str., 35, e-mail: umka711@mail.ru).*

*Makovetskij Oleg (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction Technology and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: omakovetskiy@gmail.com).*