Кудрявцев С.А., Вальцева Т.Ю., Мут А.Д., Ковшун В.С. Исследование свайно-гравитационной контрукции автодороги в условиях деградации мерзлого состояния грунтов основания // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. -2017. - T. 8, № 4. - C. 35–42. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.04

Kudriavtsev S.A., Val`tseva T.Iu., Mut A.D., Kovshun V.S. Studying the pile-gravity structure of a motorway under degradation of a frozen foundation soil. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2017. Vol. 8, no. 4. Pp. 32-42. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.04



ВЕСТНИК ПНИПУ. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА Т. 8, № 4, 2017 PNRPU BULLETIN. CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE



http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/

DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.04

УДК 624.131

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАЙНО-ГРАВИТАЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ АВТОДОРОГИ В УСЛОВИЯХ ДЕГРАДАЦИИ МЕРЗЛОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ

С.А. Кудрявцев, Т.Ю. Вальцева, А.Д. Мут, В.С. Ковшун

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 06 июля 2017 Принята: 23 августа 2017 Опубликована: 15 декабря 2017

Ключевые слова:

многолетняя мерзлота, удерживающая свайно-гравитационная конструкция, геокомпозитный ростверк, деградация мерзлого состояния грунтов, оползневый массив

РИЗИВНИЕ

Рассмотрен способ стабилизации оползневого массива на примере участка трассы «Амур» Чита — Хабаровск, в основании которого присутствуют деградирующая многолетняя мерзлота и деформации массива грунта вместе с существующим сооружением — земляным полотном участка автодороги. Предложенный способ подразумевает совместную работу удерживающей свайно-гравитационной конструкции и геокомпозитного ростверка из интегральной георешетки. Несмотря на широкое использование подобных конструкций при строительстве на дисперсных грунтах [1, 2], работа таковых на мерзлых грунтах до сих пор остается малоизученной.

Для возможности оценки и сравнения показателей по прочности и деформативности были выполнены расчетно-теоретические исследования как для существующих конструкций автодороги и состояния основания, так и для разрабатываемых конструкций и сооружений. Для достижения поставленных в техническом задании целей были использованы геотехнические программные комплексы FEMmodels, Termoground и Plaxis V82D, способные в комплексе моделировать работу сооружений по напряженнодеформированному состоянию, происходящим термодинамическим процессам в годичном цикле промерзания — оттаивания и оценке устойчивости грунтовых массивов и сооружений. Для описания работы сооружения на слабых оттаивающих основаниях применялась упругопластическая модель с предельной поверхностью, описываемой критерием Кулона—Мора. Выбор этой модели был обусловлен тем, что ее параметры могут быть взяты из имеющихся материалов стандартных инженерно-геологических изысканий. В такой постановке численные расчеты хорошо согласуются с традиционными инженерными методами расчета осадок и позволяют с достаточной точностью описать деформирование сооружений на слабых оттаивающих основаниях.

Выполненный анализ предложенного решения показал высокую эффективность и эксплуатационную надежность грунтовых сооружений, разработанных с использованием свойств современных геосинтетических материалов в сочетании с традиционными материалами и технологиями производства работ.

© ПНИПУ

© Кудрявцев Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: prn@festu.khv.ru. Вальцева Татьяна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: vtu25@mail.ru. Мут Александра Дмитриевна – аспирант, e-mail: aleksa.mut@yandex.ru. Ковшун Вячеслав Сергеевич – аспирант, e-mail: slavatennis92@mail.ru.

Sergei A. Kudriavtsev – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: prn@festu.khv.ru.

Tat`iana Iu. Val`tseva – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: vtu25@mail.ru.

Aleksandra D. Mut – Postgraduate Student, e-mail: aleksa.mut@yandex.ru.

Viacheslav S. Kovshun – Postgraduate Student, e-mail: slavatennis92@mail.ru.

STUDYING THE PILE-GRAVITY STRUCTURE OF A MOTORWAY UNDER DEGRADATION OF A FROZEN FOUNDATION SOIL

S.A. Kudriavtsev, T.lu. Val`tseva, A.D. Mut, V.S. Kovshun

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 06 July 2017 Accepted: 23 August 2017 Published: 15 Desember 2017

Keywords:

permafrost, holding pile-gravity construction, geocomposite grillage, frozen ground degradation, landslide body

ABSTRACT

In this article, one of such decisions is considered on the example of a section of the "Amur" route Chita – Khabarovsk, in the base of which there is a degrading permafrost and deformations of the soil body together with the existing structure – the roadbed of the road section. The proposed method implies the joint operation of a holding pile-gravity structure and a geocomposite grillage from an integral geogrid. Despite the widespread use of such structures during construction on disperse soils [1, 2], the work of such on frozen soils remains poorly understood.

For the possibility of evaluating and comparing strength and deformability indicators, computational and theoretical studies have been performed both for the existing structures of the road and the state of the foundation, and for designed structures. In order to achieve the goals set in the technical task, the geotechnical software complexes FEMmodels, Termoground and Plaxis V82D were used. They are able to simulate the work of the facilities in its stress-strain state, the thermodynamic processes in the annual freeze-thaw cycle and evaluation stability of soil bodies and structures. To describe the construction work on weak thawing substrates, an elastoplastic model with a limiting surface, described by the Coulomb—Mora criterion, was used. The choice of this model was due to the fact that its parameters can be taken from existing materials of standard engineering and geological surveys. In this formulation, numerical calculations are in good agreement with the traditional engineering methods for calculating the sediment and allow us to describe with sufficient accuracy the deformation of structures on weak thawing grounds.

The performed analysis of the proposed solution showed high efficiency and operational reliability of soil structures developed using the properties of modern geosynthetic materials in combination with traditional materials and production technologies.

© PNRPU

В рамках федеральной государственной программы «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 г.» предусмотрено всестороннее освоение огромных северных территорий, в том числе не только модернизация портовой инфраструктуры, но и развитие всех видов транспортного сообщения, включая линейные сооружения железнодорожных и автомобильных дорог в условиях многолетней мерзлоты.

Одна из самых актуальных проблем при строительстве автодорог в условиях многолетней мерзлоты — это деградация мерзлого грунта и, как следствие, разрушение криогенных структурных связей, а при наличии склонового участка автодороги ситуация обостряется развитием оползневого процесса.

Основной целью исследования является определение параметров эксплуатационной надежности и несущей способности существующих и рекомендованных конструкций при помощи методов численного моделирования, а также анализ эффективности применения таких конструкций в сравнении с существующими.

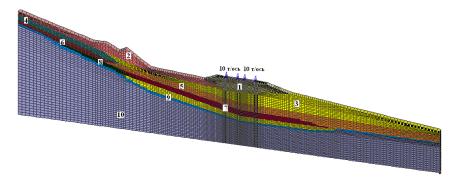
Строительство в условиях многолетней мерзлоты связано со многими проблемами, наиболее актуальная из которых – деградация мерзлого состояния грунтов. С учетом последних прогнозов повышение среднегодовой температуры воздуха на севере России к 2020 г. составит 0,9–1,5 °C, что отодвинет границу многолетней мерзлоты на 300 км [3, 4].

Исследованный в статье участок трассы «Амур» Чита – Хабаровск отвечает заданным условиям: в основании находится островная мерзлота, наблюдаются процессы сезонного глубинного промерзания и оттаивания, деградация мерзлоты, деформация массива основания существующего земляного полотна автодороги. Выше верхней границы многолетней мерзлоты образующийся талый переувлажненный слой является предопределенной по-

верхностью скольжения грунтового массива на рассматриваемом участке рельефа. Для выполнения расчетов по определению напряженно-деформированного состояния и устойчивости грунтового массива с сооружениями были приняты только реальные физикомеханические свойства грунтов, активно участвующие в процессе сдвига и проявляющие свои свойства в зоне контактных деформаций [5].

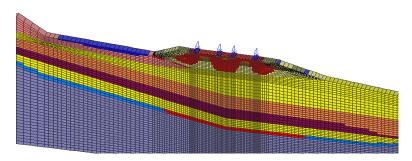
Исследование напряжено-деформированного состояния оползневого участка автодороги проводилось в программном комплексе FEMmodels. Для создания инженерногеологических условий, при которых происходят подвижки оползневого массива, принято, что удерживающие и сдвигающие силы в массиве, ограниченном предопределенной поверхностью обрушения, находятся в условиях предельного равновесия [6].

Расчетная схема представлена на рис. 1.



Puc.1. Расчетная схема деформирующегося участка автодороги Fig. 1. The design scheme of the deforming section of the highway

На рис. 2 представлены зоны упругих деформаций, обозначенные синим цветом, и зоны пластических деформаций, выделенные красным цветом. На схеме физической модели под вертикальной нагрузкой видно, что упругие деформации возникают не только в месте приложения нагрузки (местные упругие деформации), но и на некотором удалении от него [7].



Puc. 2. Зоны упругих и пластических деформаций в рассматриваемом сечении Fig. 2. Zones of elastic and plastic deformations in the considered section

Максимальные горизонтальные деформации сооружения и основания составили 3 см, а горизонтальные деформации конструкции автодороги на поверхности асфальтобетона — от 2,5 до 1,7 см. Максимальные горизонтальные перемещения массива в зоне прослойки оттаявшего мерзлого грунта достигают 2,7 см. Горизонтальные перемещения в откосной части массива — 2 см.

Вертикальные деформации откоса составляют 12 см, а деформации поверхности конструкции автодороги — 10 см. Вертикальные деформации конструкции на поверхности асфальтобетона составляют от 8,2 до 10,5 см.

По результатам численного моделирования можно сделать следующие выводы:

- зоны пластических деформаций преобладают в насыпном грунте под нагрузкой, что говорит о недостаточной несущей способности дорожной конструкции;
- наличие пластических деформаций в слое оттаявшего мерзлого грунта говорит о наличии в том месте максимальной зоны сдвига массива;
- при рассмотрении полученных вертикальных деформаций конструкции дорожной одежды можно сделать вывод о том, что грунты основания не обеспечивают несущую способность основания.

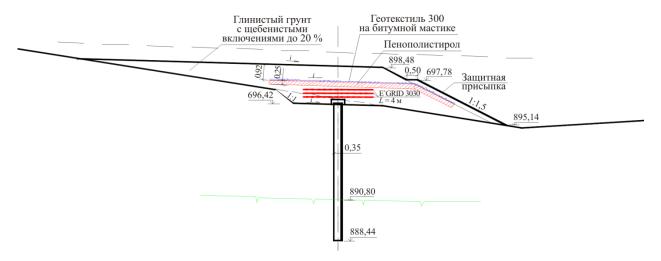
По результатам натурного обследования можно сделать вывод, что причинами деформаций рассматриваемой части автодороги стали:

- отсутствие достаточных условий для поверхностного стока дождевых и талых вод в верховой части склона и вдоль автодороги;
 - недостаточная пропускная способность водоотводящих сооружений;
 - недостаточная несущая способность конструкции автодороги;
- деградация верхнего слоя высокотемпературного многолетнемерзлого грунта, залегающего в толще основания сооружения, по причине нарушения теплового баланса просачивающейся с поверхности воды.

Главные причины местных (локальных) деформаций сдвига на откосах земляного полотна — увлажнение грунта до разжиженного состояния и движение воды в откосных частях земляного полотна по поверхности временного водоупора [8, 9].

Для снижения пластических деформаций целесообразно принять меры по увеличению несущей способности конструкции автодороги, а для снижения сползания массива грунта автомобильной дороги – предусмотреть удерживающие (так называемые пассивные) конструктивные мероприятия.

В качестве пассивной меры на данном участке была разработана свайно-грунтовая гравитационная конструкция с ростверком из геосинтетического материала с засыпкой из щебенистых грунтов (рис. 3). Возможное различие несущей способности в моделировании и натурном эксперименте объясняется тем, что компьютерная модель не учитывает нелинейную работу сваи, а также наличием коэффициента пропорциональности, зависящего от грунтовых условий, которые определяет некоторый запас прочности при компьютерном моделировании сваи [10, 11].



Puc. 3. Удерживающая свайно-гравитационная конструкция Fig. 3. Holding pile-gravity construction

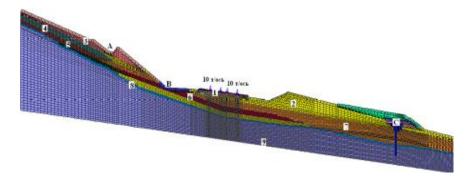
Конструкция является комбинированной. Ее основа — свайное основание из буропогруженных железобетонных свай длиной 8,0 м. Сваи прошивают оползающий массив и погружены в многолетнемерзлый грунт на расчетную глубину. Для создания равных нагрузок на сваи в рядах и работы свайных рядов между собой предусмотрено их объединение геокомпозитным ростверком из интегральной двухосной георешеткой, уложенной в несколько слоев с засыпкой послойно щебенистым грунтом. Двухосная георешетка является одним из наиболее широко применяемых геосинтетических изделий, представляет собой плоский полимерный материал в виде двуосной сетки с одинаковыми по форме и размерам ячейками, образуемыми жесткими соединениями узлов [12].

Армированный геосинтетическими материалами грунт представляет собой новый композитный конструктивно-анизотропный материал, обладающий управляемой анизотропией, которая зависит от свойств как грунта, так и армирующей структуры [13].

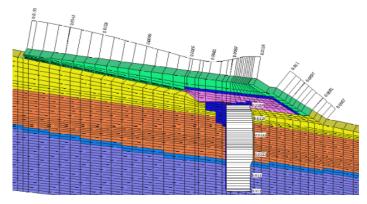
Расчет грунтового массива, армированного геосинтетикой, выполнен по Serviceability Limit States (SLS). Используются упругая модель среды и метод конечных элементов для расчета напряженно-деформированного состояния грунтового массива. Среда рассматривается как композитная, и по упругим характеристикам геосинтетики и грунта определена эквивалентная жесткость армированной среды.

При проектировании нагруженных откосов (склонов), укрепленных георешетками, вместо точного значения несущей способности, требующего знания полного решения, используется нижняя оценка несущей способности [14, 15].

На рис. 4, 5 представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния участка автомобильной дороги после реконструкции.



Puc. 4. Расчетная схема удерживающей свайно-гравитационной конструкции Fig. 4. The design scheme of a holding pile-gravity construction



Puc. 5. Эпюры горизонтальных перемещений свайной конструкции, м Fig. 5. Diagrams of horizontal movements of pile structure, m

Kudriavtsev S.A., Val`tseva T.Iu., Mut A.D., Kovshun V.S. / PNRPU Bulletin. Construction and Architecture, vol. 8, no. 4 (2017), 35–42

По результатам расчетов видно, что зона пластических деформаций проходит по кровле вечномерзлых грунтов и затухает перед противооползневыми конструкциями.

На основании результатов численного моделирования можно сделать следующие выводы:

- удерживающая свайно-гравитационная конструкция имеет только упругие деформации, что исключает необратимые подвижки сооружения;
- общие горизонтальные перемещения всего сооружения уменьшились до предельно допустимых значений по сравнению с перемещениями исходного сооружения;
 - общие вертикальные напряжения сократились на 30 %;
- горизонтальные деформации свайного ряда составляют в верхней и нижней частях
 11 мм, а в средней 12 мм;
 - горизонтальные напряжения в георешетке свайного ростверка составляют 29 кПа;
- максимальные вертикальные осадки свайно-гравитационной конструкции не превышают 4,5 см.

Таким образом, удерживающая свайная конструкция является эффективной мерой по стабилизации состояния оползневого массива в основании автодороги в условиях деградирующей многолетней мерзлоты, что говорит о широких возможностях применения подобных конструкций в сходных инженерно-геологических условиях при соответствующем технико-экономическом обосновании.

Библиографический список

- 1. Седин В.Л., Бикус Е.М., Ковба В.В. Применение модели упрочняющегося грунта в численном моделировании буроинъекционой сваи большого диаметра // Геотехника. -2014. № 4. С. 32–41.
- 2. Modeling the unsaturated soil zone in slope stability analysis / L.L. Zhang, D.G. Fredlund, M.D. Fredlund, G.W. Wilson // Canadian Geotechnical Journal. − 2014. − № 50 (12). − P. 1384–1398.
- 3. Ершов Э.Д. Деградация мерзлоты при возможном глобальном потеплении климата // Соросовский образовательный журнал. -1997. -№ 2. C. 23-27.
- 4. Чернышева Л.С. Оледенения. Арктические льды и климат: курс лекций [Электронный ресурс]. URL: http://www.dvgu.ru/meteo/Intra/ChernLect.html (дата обращения: 19.05.2017).
- 5. Berestyanyy Y.B., Kudryavtsev S.A., Goncharova E.D. Engineering and construction of geotechnical structures with geotechnical materials in coastal arctic ZONE of Russia // Proceedings of the 23rd International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference Anchorage, 30 June 5 July 2013. Alaska, USA, 2013. P. 562–566.
- 6. Pham Ha T.V., Fredlund D.G. The application of dynamic programming to slope stability analysis // Canadian Geotechnical Journal. $-2003. N_{\odot} 40 (4) P. 830-847.$
- 7. Determination of three-dimensional shape of failure in soil slopes / K. Roohollah, A. Ali, A.R. Ahmad Safuan, N. Ali, H. Mohsen // Canadian Geotechnical Journal. 2015. № 52 (9). P. 1283–1301.
- 8. Study of moisture migration in clay soils considering rate of freezing / Y.B. Berestianyi, S.A. Kudryavtsev, A.V. Kazharskyi, E.D. Goncharova // Sciences in Cold and Arid Regions: the 10th International Symposium on Permafrost Engineering in Cold Regions. -2014. - - - - 474–478.
- 9. Using designs of variable rigidity on weak soils roads in the Russian Far East / T.U. Valtseva, S.A. Kudryavtsev, R.G. Mikhailin, E.D. Goncharova // 6th International Geotechnical Symposium on Disasters Mitigation in Special Geoenvironmental Conditions, 21–23 January, 2015 / Indian Institute of Technology. Madras, Chennai, India, 2015. P. 409–412.

- 10. Ibrahim Mashhour, Adel Hanna. Drag load on end-bearing piles in collapsible soil due to inundation // Canadian Geotechnical Journal. -2016. № 53 (12). P. 2030–2038.
- 11. Motorway structures reinforced with geosynthetic materials in polar regions of Russia / Y.B. Berestianyi, S.A. Kudryavtsev, T.U. Valtseva, R.G. Mikhailin, E.D. Goncharova // The 24rd International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference, Bussan, Korea, 26–30 June. Bussan, 2014. P. 502–506.
- 12. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В.А. Ильичева, Р.А. Мангушева. М.: Изд-во АСВ, 2014. 728 с.
- 13. Introduction and application of geosynthetics in Qinghai-Tibet railway construction / J.J. Ge, J. Wei, L.M. Bao, X.M. Shi, L.H. Xuan, X.L. Li // 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics, 17–20 June, 2008. Shanghai, China, 2008. P. 817–825.
- 14. Дыба П.В., Скибин Г.М., Дыба В.П. Простейшие верхние оценки несущей способности укрепленных геотекстилем откосов // Вестник Волгогр. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. -2012. -№ 48 (29). -C. 54–59.
- 15. Paramonov V.N., Sakharov I.I., Kudryavtsev S.A. Strengthening thawed permafrost base railway embankments cutting berms // Topical Problems of Architecture, Civil Engineering, Energy Efficiency and Ecology 2016: 15th International Conference. 2016. P. 502–515.

References

- 1. Sedin V.L., Bikus E.M., Kovba V.V. Primenenie modeli uprochniaiushchegosia grunta v chislennom modelirovanii buroin"ektsionoi svai bol'shogo diametra [Application of the model of hardening soil in the numerical simulation of a large-bore pile injection pile]. *Geotekhnika*, 2014, no. 4, pp. 32-41.
- 2. Zhang L.L., Fredlund D.G., Fredlund M.D., Wilson G.Ward. Modeling the unsaturated soil zone in slope stability analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, no. 50(12), pp. 1384-1398.
- 3.Ershov E.D. Degradatsiia merzloty pri vozmozhnom global'nom poteplenii klimata [Degradation of permafrost in case of possible global warming]. *Soros educational journal*, 1997, no. 2, pp. 23-27.
- 4. Chernysheva L.S. Oledeneniia. Arkticheskie l'dy i klimat [Glaciation. Arctic ice and climate]. Kafedra meteorologii, klimatologii i okhrany atmosfery DVGU.
- 5. Berestyanyy Y.B., Kudryavtsev S.A., Goncharova E.D. Engineering and construction of geotechnical structures with geotechnical materials in Coastal Arctic Zone of Russia. *The 23rd International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference Anchorage*, 30 June 5 July, Alaska, USA, 2013, pp.562-566.
- 6. Pham Ha T.V., Fredlund D.G. The application of dynamic programming to slope stability analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, no. 40(4), pp. 830-847.
- 7. Roohollah K., Ali A., Ahmad Safuan A. R., Ali N., Mohsen H. Determination of three-dimensional shape of failure in soil slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, no. 52 (9), pp. 1283-1301.
- 8. Berestianyi Y.B., Kudryavtsev S.A., Kazharskyi A.V., Goncharova E.D. Study of moisture migration in clay soils considering rate of freezing. *The 10th International Symposium on Permafrost Engineering in Cold Regions. Sciences in cold and arid regions*, 2014, no. 6, pp.474-478.
- 9. Valtseva T.U., Kudryavtsev S.A., Mikhailin R.G., Goncharova E.D. Using designs of variable rigidity on weak soils roads in the Russian Far East. *6th International geotechnical symposium on Disasters Mitigation in Special Geoenvironmental Conditions*. 21-23 January, Indian Institute of Technology, Madras, Chennai, India, 2015, pp. 409-412.

- 10. Ibrahim Mashhour, Adel Hanna. Drag load on end-bearing piles in collapsible soil due to inundation. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, no. 53(12), pp. 2030-2038.
- 11. Berestianyi Y.B., Kudryavtsev S.A., Valtseva T.U., Mikhailin R.G., Goncharova E.D. Motorway Structures Reinforced with Geosynthetic Materials in Polar Regions of Russia. *The 24rd International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference*. 26 -30 June, Bussan, Korea, 2014, pp. 502-506.
- 12. Spravochnik geotehnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya [Directory geotechnics. Bases, foundations and underground structures]. Moscow, ASV, 2014, 728 s.
- 13. Ge J.J., Wei J., Bao L.M., Shi X.M., Xuan L.H., Li X.L. Introduction and application of geosynthetics in Qinghai-Tibet Railway construction. *4-th Asian Regional Conference on Geosynthetics*. 7-20 June, Shanghai, China, 2008, pp. 817-825.
- 14. Dyba P.V., Skibin G.M., Dyba V.P. Prosteishie verkhnie otsenki nesushchei sposobnosti ukreplennykh geotekstilem otkosov [The simplest of the upper dimensions of the capabilities of the sheltered geotecstyle of slopes]. *Vestnik VolgGASU. Ser.: Str-vo i arkhit*, 2012, no. 48(29), pp. 54-59.
- 15. Paramonov V.N., Sakharov I.I., Kudryavtsev S.A. Strengthening Thawed Permafrost Base Railway Embankments Cutting Berms. *15th International Conference "Topical Problems of Architecture, Civil Engineering, Energy Efficiency and Ecology* 2016, 2016, pp. 502-515.