

DOI 10.15593/2409-5125/2018.01.13

УДК 504.064.45, 624.138/2

Е.П. Анферов, А.С. Гришина, Р.С. Смирнов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ АРМИРУЮЩИХ ВОЛОКОН ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Актуальной задачей для Пермского края является разработка эффективных методов по переработке и утилизации техногенных образований и отходов. В настоящем исследовании предлагается применять волокнистые отходы предприятий края в качестве армирующих волокон для создания грунтового композита с улучшенными механическими свойствами – фиброгрунта. Фиброармированный грунт – геокомпозитный материал, в грунтовую матрицу которого введены короткие отрезки волокон, равномерно распределенные по всему объему и имеющие произвольную ориентацию. Армирующие волокна вводятся в массив грунта для придания ему оптимального гранулометрического состава и улучшения его характеристик. Технология фибрового армирования может быть применена при восстановлении оползневых откосов и склонов, повышения устойчивости грунтовых оснований в дорожном строительстве, при устройстве армогрунтовых подпорных стен и откосов и т.д.

В статье приведены результаты лабораторных экспериментов по изучению влияния армирования волокнистыми отходами на механические характеристики песчаного грунта. Путем анализа полученных данных была доказана эффективность фибрового армирования. По мнению авторов, успешное решение проблемы использования фиброгрунта, армированного волокнистыми отходами производства, в строительстве позволит возводить эффективные и надежные геотехнические конструкции, одновременно сократив объемы отходов промышленности.

Ключевые слова: утилизация техногенных отходов, волокнистые отходы, армирующие волокна, геосинтетические материалы, испытания на одноплоскостной срез, компрессионное сжатие.

Пермский край является одним из наиболее промышленно развитых субъектов Российской Федерации. Основа экономики края – высокоразвитый промышленный комплекс. Согласно ежегодным государственным докладам «О состоянии и об охране окружающей среды в Российской Федерации» Пермский край регулярно «лидирует» по антропогенным воз-

Анферов Е.П., Гришина А.С., Смирнов Р.С. Исследование возможного применения волокнистых отходов в качестве армирующих волокон для создания эффективных геотехнических конструкций // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2018. – № 1. – С. 168–177. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.01.13

Anferov E., Grishina A., Smirnov R. Research of possible application of fibrous waste as reinforcing fibres for the creation of efficient geotechnical constructions. PNRPU. Applied ecology. Urban development. 2018. No. 1. Pp. 168-177. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.01.13

действиям на атмосферу, водные объекты и по массе образующихся отходов. Одной из основных задач в области экологии, в соответствии с государственной программой Пермского края «Воспроизводство и использование природных ресурсов», утвержденной постановлением правительства Пермского края от 3.10. 2013 г. № 1330-п, является снижение выбросов в атмосферу и сокращение объемов отходов.

Помимо мероприятий, включенных в утвержденную комплексную экологическую программу региона, для улучшения экологической обстановки необходима разработка эффективных методов по переработке и утилизации техногенных образований и отходов. Одним из таких методов может стать применение волокнистых отходов в качестве армирующих волокон для создания грунтовых композитов с улучшенными механическими свойствами.

Задача преобразования строительных свойств грунтов также актуальна для Пермского края, так как его территория характеризуется сложными инженерно-геологическими условиями [1]. Строительство зданий и сооружений в таких условиях зачастую оказывается сложной задачей. Большая часть проблем, с которыми сталкиваются инженеры-геотехники, может быть решена путем целенаправленного улучшения свойств грунтов. Одним из перспективных методов их преобразования является армирование. За счет армирования можно добиться увеличения несущей способности грунтового массива, снижения деформативности оснований, улучшения работы грунтов под статическими и динамическими нагрузками. Армогрунт представляет собой композиционный материал, состоящий из чередующихся слоев уплотненной грунтовой засыпки и искусственного армирующего материала [2]. Традиционные методы армирования грунта предусматривают использование непрерывных плоских включений (например, металлических полос, георешеток, геосеток, геотекстилей, геоячеек) [3–5].

В качестве альтернативы армированию грунтов рулонными материалами в данном исследовании предлагается технология армирования грунтов равномерно распределенными отдельными волокнами – фибровое армирование. Фиброгрунт – геокомпозитный материал, в грунтовую матрицу которого введены короткие отрезки волокон, равномерно распределенные по всему объему и имеющие произвольную ориентацию [6]. Армирующие волокна вводятся в массив грунта для придания ему оптимального гранулометрического состава и улучшения его характеристик. При фибровом армировании грунтов можно добиться изотропного увеличения прочности без плоскостей наименьшего сопротивления, которые появляются при тра-

диционном типе армировании на границе рулонная арматура – грунт [7]. Применение фиброармированных грунтов позволит решить такие проблемы в области строительства, как устройство оснований повышенной несущей способности, возведение прочных и устойчивых насыпей автомобильных дорог, возведение нагруженных подпорных стен и т.д. [8].

В качестве фибрового армирования может быть использован широкий спектр материалов, как природных, так и синтетических [9]. В большинстве исследований в качестве армирующих волокон применяется полипропиленовая фибра, выпускаемая для армирования бетонов [10, 11]. Настоящим исследованием предлагается использование в качестве арматуры волокнистых отходов химической и текстильной промышленности. По мнению авторов, применение фиброгрунтовых композитов позволит повысить эффективность геотехнических конструкций и одновременно утилизировать отходы производства синтетических и минеральных волокон, имеющихся на ряде предприятий Пермского края.

Целью исследования является оценка влияния армирования волокнистыми отходами производств на механические характеристики песчаных грунтов для дальнейшего применения полученных геокомпозитов при создании эффективных геотехнических конструкций.

В качестве инструмента исследования выбраны лабораторные испытания грунтов и грунтовых композитов методами компрессионного сжатия и одноплоскостного среза. Испытания были проведены в соответствии с ГОСТ 12248–2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости». Эти методы испытаний позволяют получить прочностные и деформационные характеристики грунтов, которые необходимы для проектирования оснований и фундаментов в соответствии с СП 22.13330.2011 и СП 50-100–2004, а также для включения их в качестве входных параметров в различные программные комплексы (Plaxis, Crisp и др.) [12]. В то же время проведенные испытания на сжатие и сдвиг экономичны, а испытательное оборудование и методы испытаний соответствуют приведенным российским стандартам.

Для исследования влияния фибрового армирования на механические характеристики несвязного грунта был использован однородный мелкий песок с фиксированной влажностью и гранулометрическим составом. Удельный вес песка $\gamma = 16,1 \text{ кН/м}^3$. Образцы были изготовлены из песка оптимальной влажности, определенной прибором стандартного уплотнения, которая составила $w = 8 \%$ [13]. Кривая гранулометрического состава приведена на рис. 1.

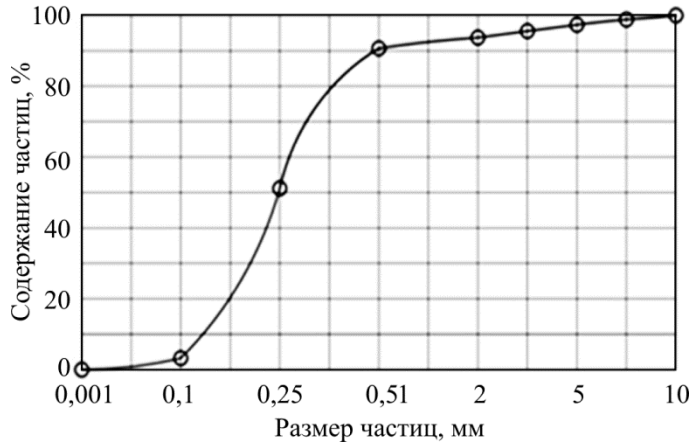


Рис. 1. Кривая гранулометрического состава

В качестве армирующих элементов были использованы отходы от производства синтетических тканей. Отходы были получены от предприятия, занимающегося производством промышленных сеток. Сетки были произведены из полипропилена и полиэфира. Отходы представляли собой отрезки нитей длиной от 2 до 50 мм, перемешанные с кусочками синтетических тканей размером, не превышающим 2 см^2 (рис. 2).

Фиброармированный песок был приготовлен с содержанием волокон 2 и 3 % по массе сухого грунта. Содержание армирующей фибры f , %, определяется здесь как:

$$f = \frac{W_f}{W_s} \cdot 100,$$

где W_f – вес фибры; W_s – вес сухого песка. Образцы фиброармированного песка были изготовлены той же плотности и влажности, как и неармированные ($\gamma = 16,1 \text{ кН/м}^3$, $w = 8 \%$). Волокна фибры были перемешаны вручную до получения однородной фибропесчаной смеси [14]. Пример образца фиброармированного песка показан на рис. 3.

Деформационные характеристики песчаного грунта и фибропесчаных композитов были получены по результатам испытаний компрессионного сжатия. Диаметр образцов составил 87 мм, высота – 25 мм. Нагрузка на образцы передавалась ступенями, равными 25, 50, 100, 200, 300. Переход к каждой следующей ступени осуществлялся при достижении условной стабилизации грунта, за критерий которой принималось приращение деформации, не превышающее 0,05 % за 0,5 ч.



Рис. 2. Отходы производства синтетических тканей



Рис. 3. Пример фиброармированного песка

Прочностные характеристики песчаного грунта и фибропесчаных композитов были получены по методу одноплоскостного среза по консолидированно-дренированной схеме [15]. Предварительное уплотнение грунтов производилось в уплотнителе до достижения стабилизации деформации. После этого образцы переносились в срезную коробку и нагружались нормальным давлением, при котором происходило уплотнение грунта. Испытание на срез проводилось в кинематическом режиме с заданной скоростью среза 0,5 мм/мин. Диаметр образцов составил 71,4 мм, высота – 35 мм. Образцы песка и фибропесчаных композитов были испытаны при значениях нормального давления 100, 200 и 300 кПа. За критерий окончания испытания принимался момент, когда выполнялось одно из двух условий: либо срезающая нагрузка достигала максимального значения, после чего начиналось некоторое ее снижение, либо относительная деформация образца превысила 10%.

Все лабораторные испытания были проведены с шестикратной повторяемостью для исключения ошибок и дальнейшей статистической обработки данных. Результаты определения деформационных (модуля общей деформации E_0 , МПа) и прочностных характеристик (удельного сцепления c , кПа, угла внутреннего трения φ , °) приведены в табл. 1 и 2. Для наглядной оценки влияния процента фибрового армирования на свойства грунта значения механических характеристик неармированных образцов были приняты за единицу, а изменение параметров у армогрунта было выражено в долях единицы (д.е.). В таблицах также приведены относительные изменения характеристик в результате армирования.

По результатам испытаний также были построены диаграммы зависимости значений модуля общей деформации, удельного сцепления и угла внутреннего трения от содержания фибры в грунте (рис. 4–6).

Таблица 1

Результаты испытаний на компрессионное сжатие

Интервал нагрузки, МПа	Значение модуля деформации E_0 , МПа			Относительное изменение модуля деформации E_0 , д.е.		
	песок	песок +2 % волокнистые отходы	песок +3 % волокнистые отходы	песок	песок +2 % волокнистые отходы	песок +3 % волокнистые отходы
0,1–0,2	6,69	7,81	8,9	1	1,17	1,33
0,2–0,3	11,39	16,0	16,44	1	1,4	1,44

Таблица 2

Результаты испытаний на сдвиг

Параметр прочности	Значение прочностных характеристик			Относительное изменение прочностных характеристик, д.е.		
	песок	песок +2 % волокнистые отходы	песок +3 % волокнистые отходы	песок	песок +2 % волокнистые отходы	песок +3 % волокнистые отходы
Удельное сцепление c , кПа	7,9	23,6	41,3	1	2,99	5,23
Угол внутреннего трения φ , °	33,9	34,7	35,9	1	1,02	1,06



Рис. 4. Зависимость модуля деформации от содержания фибры в образцах грунта

Результаты проведенных испытаний показывают, что внедрение в песчаный грунт пластиковых волокон отходов способствует увеличению исследуемых показателей, а именно модуля общей деформации, удельного сцепления грунта и угла внутреннего трения. При этом с увеличением

содержания фибры в грунте от 0 до 3 % эффективность армирования возрастает. За счет армирования волокнистыми отходами можно добиться увеличения значений удельного сцепления в 3–5 раз, угла внутреннего трения – на 2–6 %. Модуль деформации в результате армирования увеличивается на 17–33 и 40 % в интервале давлений 200–300 кПа. По результатам исследований можно отметить, что применение отходов в качестве армирующих волокон является перспективным методом для решения проблем в области геотехники.



Рис. 5. Зависимость удельного сцепления от содержания фибры в образцах грунта



Рис. 6. Зависимость угла внутреннего трения от содержания фибры в образцах грунта

Результаты исследования позволяют предположить, что одним из возможных направлений утилизации отходов производства синтетических тканей из полипропилена и полиэфира является их применение в качестве

материала для армирования грунта. В результате испытаний установлено, что при равномерном смешивании волокнистых отходов с песчаным грунтом можно добиться увеличения его механических характеристик, при этом с увеличением процента содержания волокон в грунте эффективность армирования возрастает.

Библиографический список

1. Калошина С.В., Пономарев А.Б. Об инженерно-геологических условиях строительства г. Перми // Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях: тр. междунар. науч.-техн. конф., посвященной 50-летию БашНИИСтроя: в 3 т. – Уфа, 2006. – Т. 2. – С. 119–124.
2. Игошева Л.А., Гришина А.С. Обзор основных методов укрепления грунтов основания // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2016. – Т. 7, № 2. – С. 5–21.
3. Применение геосинтетических материалов при проектировании автомобильных стоянок в сложных инженерно-геологических условиях / Л.А. Игошева, О.А. Петренева, В.И. Клевекко // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии: электрон. интернет-журнал. – 2015. – Вып. № 4. – URL: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=4&s=243> (дата обращения: 19.10.2017).
4. Щербина Е.В. Геосинтетические материалы в строительстве: моногр. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 111 с.
5. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals / A.A. Bartolomey, V.I. Kleveko, V.G. Ofrikhter, A.B. Ponomaryov, A.N. Bogomolov // Geotechnical engineering for transportation infrastructure. Proceedings of the 12th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. – Amsterdam, 1999. – Vol. 2. – P. 1197–1202.
6. Diambra A., Ibraim E. Fibre reinforced sands: experiments and modeling // Geotextiles and Geomembranes. – 2010. – № 28. – P. 238–250.
7. Пономарев А.Б., Оффрихтер В.Г. Анализ и проблемы исследований геосинтетических материалов в России // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 2. – С. 68–73.
8. Пономарев А.Б., Кузнецова А.С., Оффрихтер В.Г. Применение фиброармированного песка в качестве основания зданий и сооружений // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2013. – Вып. 30 (49). – С. 101–107.
9. Hejazi S.M., Sheikhzadeh M.A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers // Construction and Building Materials. – 2012. – № 30. – С. 101–116.
10. Пухаренко Ю.В. Особенности приготовления фибробетонных смесей // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 1 (30). – С. 157–162.
11. Пономарев А.Б., Кузнецова А.С., Богомолова О.А. Результаты исследований фиброармированного песка // Актуальные проблемы геотехники: сб. ст., посвященный 60-летию профессора А.Н. Богомолова / под ред. А.Н. Богомолова, А.Б. Пономарева. – Волгоград, 2014. – С. 140–147.
12. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2008. – 696 с.
13. Колесова А.С., Шаньгина Ю.М., Гришина А.С. Анализ эффективности применения фиброармированного песка при устройстве насыпей автомобильных дорог и обратной засыпки подпорных стен // Геотехника. – 2016. – № 4. – С. 10–15.
14. Гришина А.С., Смирнов Р.С., Пономарев А.Б. Оценка эффективности работы подпорной стены с обратной засыпкой из фиброармированного грунта по модельным испытаниям // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 2 (61). – С. 125–132.
15. Yetimoglu T., Salbas O. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers // Geotextiles and Geomembranes. – 2003. – № 21. – С. 103–110.

References

1. Kaloshina S.V., Ponomaryov A.B. Ob inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh stroitelstva g. Permi [About engineering-geological conditions of construction of Perm city]. *Problemy mekhaniki gruntov I fundamentostroeniya v slozhnykh gruntovykh usloviyakh: tr. mezhdunar. nauch.-tehnich. konf., posviashchennoy 50-letiyu BashNIStroya: v 3-h t.*, Ufa, 2006, vol. 2, pp. 119-124.
2. Igosheva L.A., Grishina A.S. Obzor osnovnykh metodov ukrepleniya gruntov osnovaniya [Review of the basic methods of the ground improvement]. *PNRPU Bulletin Construction and architecture*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 5-21.
3. Igosheva L.A., Kleveko V.I., Petreueva O.A. Primenenie geosinteticheskikh materialov pri proektirovaniy avtomobil'nykh stoianok v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh [The use of geosynthetics when designing parkings in difficult geotechnical conditions]. *Electronic online journal «Stroitel'stvo i arkhitektura. Opyt I sovremennye tekhnologii»*, 2015, № 4, available at: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=4&s=243> (accessed 19 October 2017).
4. Shcherbina E.V. Geosinteticheskiye materiali v stroitelstve [Geosynthetics in construction]: *monograph*. – M.: DIA publishing house, 2004, 111 p.
5. Bartolomey A.A., Kleveko V.I., Ofrikhter V.G., Ponomaryov A.B., Bogomolov A.N. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals *Geotechnical engineering for transportation infrastructure. Proceedings of the 12th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Amsterdam*, June 1999, vol. 2, pp. 1197-1202.
6. Diambra A., Ibrahim E. Fibre reinforced sands: experiments and modeling. *Geotextiles and Geomembranes*. 2010, no. 28, pp. 238-250.
7. Ponomarev A.B., Ofrikhter V.G. Analiz i problemy issledovaniy geosinteticheskikh materialov v Rossii [The analysis and problems of researches of geosynthetics in Russia]. *Vestnik PNIPU Ser.: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2013, no. 2, pp. 68-73.
8. Ponomarev A.B., Kuznetsova A.S., Ofrikhter V.G. Primenenie fibroarmirovannogo peska v kachestve osnovaniya zdaniy i sooruzheniy [Use of fibroarmirovanny sand as foundation of buildings and constructions]. *The Bulletin of the Volgograd state architectural and structural university. Series: Construction and architecture*, 2013, Iss. 30(49), pp. 101-107.
9. Hejazi S. M. Sheikhzadeh M. A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 2012, no. 30, pp. 101-116.
10. Pukhareno Yu. V. Osobennosti prigotovleniya fibrobetonnykh smesey [Features of preparation fiber reinforced concrete mixtures]. *Messenger of civil engineers*, 2012, no. 1 (30), pp. 157-162.
11. Ponomaryov A.B., Kuznetsova A.S., Bogomolova O.A. Rezultaty issledovaniy fibroarmirovannogo peska [Results of researches of reinforced fibres sand]. *Current problems of geotechnics. The collection of articles devoted to the 60 anniversary of professor A.N. Bogomolov*. Volgograd, 2014, pp. 140-147.
12. Boldyrev G.G. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov. Sostoyanievo-prosa [Methods of mechanical test of soils. Condition of a question]. Penza: PGUAS, 2008, 696 p.
13. Kolesova A.S., Shan'gina Yu.M., Grishina A.S. Analiz effektivnosti primeniya fibroarmirovannogo peska pri ustroystve nasypey avtomobil'nykh dorog i obratnoy zasypki podpornykh sten [The analysis of efficiency of use of fiber reinforced sand at building the embankments of highways and backfilling the retaining walls]. *GeoTehnika*, 2016, no. 4, pp. 10-15.
14. Grishina A.S., Smirnov R.S., Ponomaryov A.B. Otsenka effektivnosti raboty podpornoj steny s obratnoy zasypkoy iz fibroarmirovannogo grunta po model'nym ispytaniyam [Performance evaluation of retaining wall with fiber reinforced sand backfill by model test]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2017, no. 2 (61), pp. 125-132.
15. Yetimoglu T., Salbas O.A. study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. *Geotextiles and Geomembranes*. 2003, no. 21, pp. 103–110.

Получено 30.10.2017

E. Anferov, A. Grishina, R. Smirnov

RESEARCH OF POSSIBLE APPLICATION OF FIBROUS WASTE AS REINFORCING FIBRES FOR THE CREATION OF EFFICIENT GEOTECHNICAL CONSTRUCTIONS

Perm Krai is one of the most industrially developed regions of the Russian Federation, thus there is a number of environmental problems in the region. One of the objectives in the field of environmental protection for the Perm Krai is the development of effective methods for processing and recycling of man-made mineral formations and wastes. The present study proposes the use of industrial fibrous waste as reinforcing fibers for the creation of a soil composite material with improved mechanical properties, so called fiber soil. Fiber reinforced soil is a geocomposite material that can be defined as soil mass containing regularly spaced randomly oriented discrete fibers, which ensure an improvement in the mechanical behavior of the soil composite. There is a wide variety of potential applications of fiber reinforced soil. The technology of fiber reinforcement can be used to restore landslide slopes, to improve the stability of subgrade soils in road construction, to construct reinforced ground retaining walls and slopes, and so on. In the paper the results of laboratory experiments on studying the effect of fibrous waste reinforcement on the mechanical characteristics of sandy soil are presented. The obtained data has been analyzed and the efficiency of fiber reinforcement has been proved. According to the authors, successful introduction of fibrous waste reinforced soil into the construction practice will allow erecting efficient and reliable geotechnical structures while reducing the amount of industrial waste.

Keywords: technogenic waste recycling, fibrous waste, reinforced fibres, geosynthetics, shear test, compression test.

Анферов Егор Павлович (Пермь, Россия) – студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: anferovegor@gmail.com).

Гришина Алла Сергеевна (Пермь, Россия) – аспирант, ст. преподаватель кафедры «Строительное производство и геотехника», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: koallita@yandex.ru).

Смирнов Роман Сергеевич (Пермь, Россия) – студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: smirnov_roman@inbox.ru).

Anferovov Egor (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: anferovegor@gmail.com).

Grishina Alla (Perm, Russian Federation) – Postgraduate student, Senior Lecturer of the Department of “Building production and geotechnics”, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: koallita@yandex.ru).

Smirnov Roman (Perm, Russian Federation) – Student of the Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: smirnov_roman@inbox.ru).