

DOI 10.15593/2409-5125/2015.04.03

УДК 624.164.3

**В.И. Клевеко, К.Р. Кашапова**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ПОДПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ЗАСЫПКОЙ ИЗ ФИБРОАРМИРОВАННОГО ГРУНТА**

Подпорные конструкции широко применяются в городском строительстве в качестве подпорных стен, ограждений котлованов, устоев мостов с вертикальными заборными стенками и других конструкций. Устой моста – важный элемент мостового перехода, который обеспечивает сопряжение моста и подходной насыпи. Все подпорные конструкции, в том числе и устои мостов, воспринимают значительное горизонтальное давление, поэтому его уменьшение позволяет снизить стоимость строительства таких сооружений. Уменьшить горизонтальное давление грунта можно путем повышения прочностных характеристик грунтов обратной засыпки подпорных конструкций. Для этого существует множество методов, одним из самых перспективных является армирование грунта. В последнее время появился новый тип армирования грунтов – фиброармирование, т.е. использование коротких армирующих элементов из синтетических волокон, равномерно распределенных в массиве грунта. Применение фиброармирования позволяет значительно увеличить значения прочностных характеристик грунтов (особенно для удельного сцепления).

Для оценки влияния фиброармирования на работу подпорных конструкций было выполнено компьютерное моделирование устоя моста с вертикальной заборной стенкой. Устои мостовых переходов в виде подпорной конструкции имеют сложное напряженно-деформированное состояние, которое удобнее всего изучать методом конечных элементов. Для расчетов использовался пакет прикладных программ PLAXIS, реализующий метод конечных элементов.

Представлены результаты расчета армогрунтовой подпорной конструкции с использованием фиброармирования. Проведено сравнение вариантов использования в качестве грунта обратной засыпки, обычного и фиброармированного песка. Анализ результатов показал, что применение фиброармированного песка позволяет снизить горизонтальное давление на подпорные конструкции в 1,7 раза.

**Ключевые слова:** подпорные конструкции, мостовые переходы, устой моста, метод конечных элементов, армогрунтовые сооружения, армирующие прослойки, геосинтетики, фиброармирование, фибровые волокна.

Широкое развитие строительной отрасли нашей страны влечет за собой необходимость развития и транспортных систем. Для повышения безопасности, увеличения комфорта и роста качества жизни населения необходимо совершенствовать не какую-либо отдельную часть, а весь дорожно-транспортный комплекс в целом. Немаловажным компонентом дорожно-транспортного комплекса являются мосты.

Развитие мостостроения – одна из актуальных проблем всей строительной отрасли. Основной задачей при возведении мостов является увеличение качества объекта путем усиления конструкций, увеличения показателей их надежности и прочности.

Важнейшими конструкциями мостовых переходов являются устои мостов. Устой моста – это береговые опоры, которые необходимы для удержания насыпей подходов от обрушения. Кроме того, устои выполняют роль сопряжения моста с подходами. В ряде случаев устои мостовых переходов, особенно небольших пролетов, выполняют в виде подпорных стенок для уменьшения длины моста и, следовательно, его стоимости. Такой устой работает в сложных условиях, а именно воспринимает как вертикальные нагрузки от пролетного строения, так и горизонтальные, возникающие от давления грунта и временных транспортных нагрузок. Максимально возможное уменьшение горизонтальных нагрузок является одной из основных задач при проектировании всех подпорных конструкций и устоев мостов в том числе.

Действующие нормативные документы по проектированию мостов (СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84\*) требуют использования, в качестве грунта обратной засыпки, только песчаные или другие грунты (крупнообломочные) с коэффициентом фильтрации более 2,0 м/с. Для подпорных стен (СП 43.13330.2012. Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03–85) в качестве грунта обратной засыпки также рекомендуется использовать дренирующие грунты (песчаные или крупнообломочные), но допускается использовать и связные грунты (супеси и суглинки). Однако применение связных грунтов в наших суровых климатических условиях может привести к возникновению сил морозного пучения, т.е. появлению допол-

нительных горизонтальных нагрузок на несущие конструкции подпорных стен, что нередко приводит к аварийным ситуациям [4, 6]. Таким образом, для обратной засыпки подпорных конструкций можно применять только песчаные грунты.

В общем случае горизонтальное давление на подпорные конструкции зависит от высоты засыпки, удельного веса грунта  $\gamma$  и прочностных характеристик грунта – угла внутреннего трения  $\phi$ , удельного сцепления  $C$ . При прочих равных условиях наименьшее горизонтальное давление на подпорные конструкции будут иметь грунты с более высокими значениями прочностных характеристик грунтов, особенно сильное влияние оказывает удельное сцепление  $C$ .

Одним из вариантов снижения горизонтальных нагрузок, действующих на несущую часть устоя моста, является использование армогрунтовых конструкций, вследствие того, что армогрунт позволяет скомпенсировать давление грунта основания [1–11].

Применение прослоек из геосинтетических материалов, таких как геосетки и георешетки, позволяет создавать прочные, надежные, долговечные и сравнительно недорогие конструкции в сложных условиях, поэтому они широко применяются в транспортном строительстве [2, 5, 8, 11]. Тем не менее свойства таких конструкций еще недостаточно изучены и требуют предварительных расчетов перед непосредственным применением в реальных условиях эксплуатации.

В настоящее время в качестве арматуры применяются три различных типа элементов:

- 1) вертикальные элементы (сваи и т.п.);
- 2) горизонтальные элементы (стержни, решетки, ткани и т.п.);
- 3) хаотически расположенные короткие элементы (фиброармирование).

Каждый из этих типов армирования имеет свои достоинства и недостатки. Для подпорных конструкций обычно применяются горизонтальные армирующие элементы из геосинтетических прослоек [1–3, 12–14]. Такие подпорные конструкции получили широкое распространение, особенно в зарубежных странах. Применение армогрунтовых подпорных стен и устоев мостов позволяет создавать сравнительно дешевые и долговечные конструкции

[13]. Основное достоинство армогрунтовых подпорных конструкций состоит в том, что горизонтальные армирующие элементы позволяют полностью компенсировать горизонтальное давление на подпорные конструкции. Но технология их возведения достаточно трудоемка, так как требует послойной укладки геосинтетических прослоек и уплотнения грунта между ними.

Кроме использования армирующих прослоек из геосинтетиков существуют и другие методы усиления свойств грунтов. Одним из наиболее перспективных методов является фибровое армирование. Применение фиброармированных грунтов для таких конструкций изучено еще недостаточно хорошо. Поэтому в настоящее время на кафедре СПГ ПНИПУ проводится большой объем исследований таких грунтов [16–19].

Фиброармирование заключается в равномерном распределении волокон фибры в массиве грунта, что способствует улучшению его физико-механических характеристик: плотности, прочности на сдвиг, сжимаемости, гидравлической проводимости и др. Усиленный фибровым волокном грунт ведет себя как композиционный, стабилизированный материал, применение которого значительно упрощает процесс строительства.

Для проверки эффективности использования фиброгрунта в качестве обратной засыпки подпорных конструкций было выполнено компьютерное моделирование работы устоя моста, конструкция которого представлена на рис. 1. Основные геометрические размеры и нагрузки на несущие конструкции устоя приняты по данным, приведенным в работе [14].

Для моделирования работы устоя моста с обратной засыпкой из фиброармированного грунта был использован пакет прикладных программ PLAXIS, который использует метод конечных элементов и широко применяется для геотехнических расчетов [3, 5, 7, 8, 13].

В качестве грунта засыпки устоя были использованы два типа грунта:

1) песок, армированный полипропиленовыми волокнами в количестве 5 %, со следующими характеристиками  $\gamma = 16,4 \text{ кН/м}^3$ ,  $C = 36 \text{ кПа}$ ,  $\varphi = 39^\circ$ ,  $E = 33 \text{ МПа}$ ;

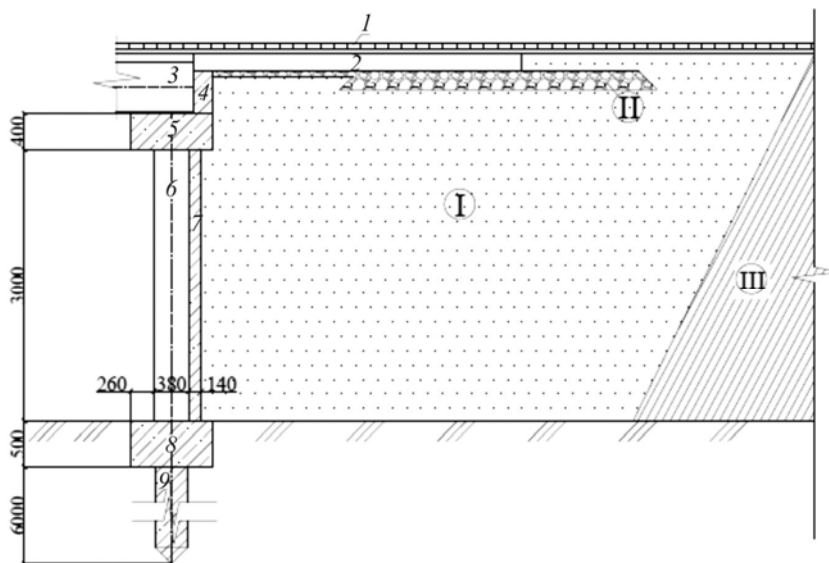


Рис. 1. Конструкция армогрунтового устоя мостового перехода: 1 – покрытие автодороги; 2 – переходная плита; 3 – пролетное строение моста; 4 – шкафная стенка; 5 – ригель опоры; 6 – стойки опоры; 7 – плиты заборной стенки; 8 – ростверк свайного фундамента; 9 – свайный фундамент. (I – песок гравелистый; II – фракционный щебень; III – грунт земляного полотна)

2) песок неармированный, со следующими характеристиками  $\gamma = 16,4 \text{ кН/м}^3$ ,  $C = 0 \text{ кПа}$ ,  $\varphi = 33^\circ$ ,  $E = 30 \text{ МПа}$ .

Значения характеристик грунтов приняты по результатам испытаний, проведенных в лаборатории кафедры СПГ ПНИПУ А.С. Кузнецовой [16–18].

Для оценки эффективности работы фиброармированного грунта в качестве критерия были использованы величины максимального горизонтального перемещения устоя моста и максимального изгибающего момента в основных несущих конструкциях устоя (стойках), который прямо пропорционален горизонтальному давлению, так как программный комплекс PLAXIS не позволяет непосредственно определить величину горизонтального давления.

Результаты расчета конструкции устоя моста приведены на рис. 2–5 и в таблице.

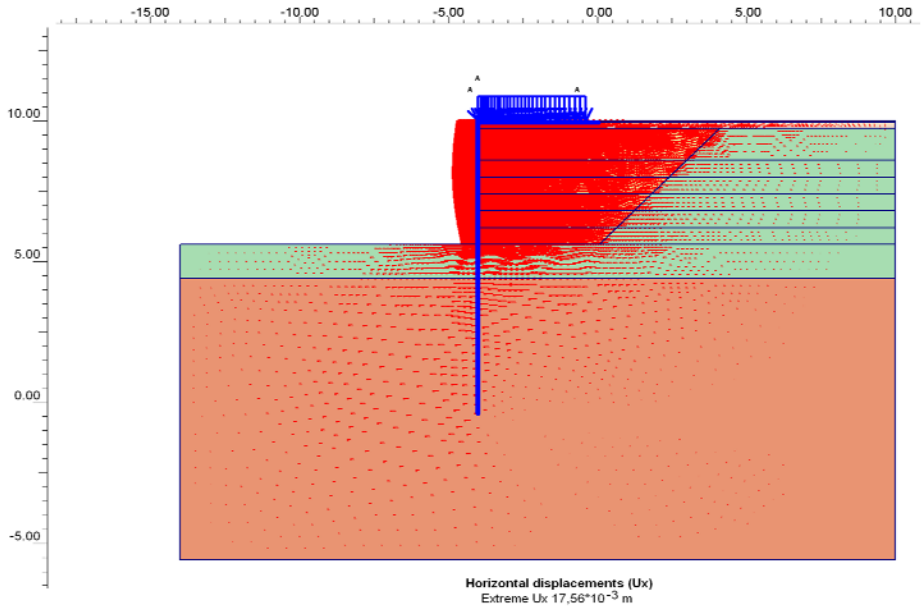


Рис. 2. Эпюра горизонтального перемещения в несущих конструкциях устоя моста с засыпкой из неармированного песка

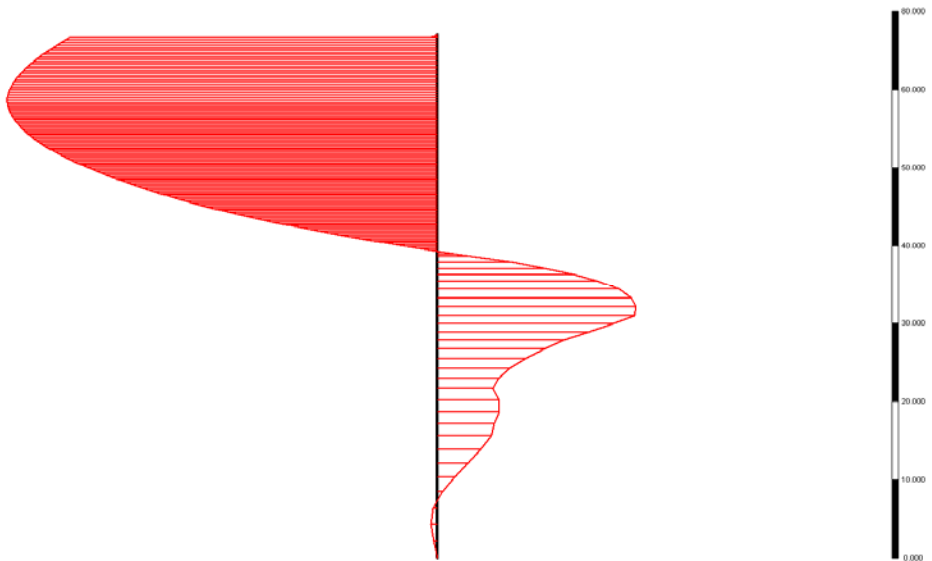


Рис. 3. Эпюра изгибающего момента в несущих конструкциях устоя моста с засыпкой из неармированного песка

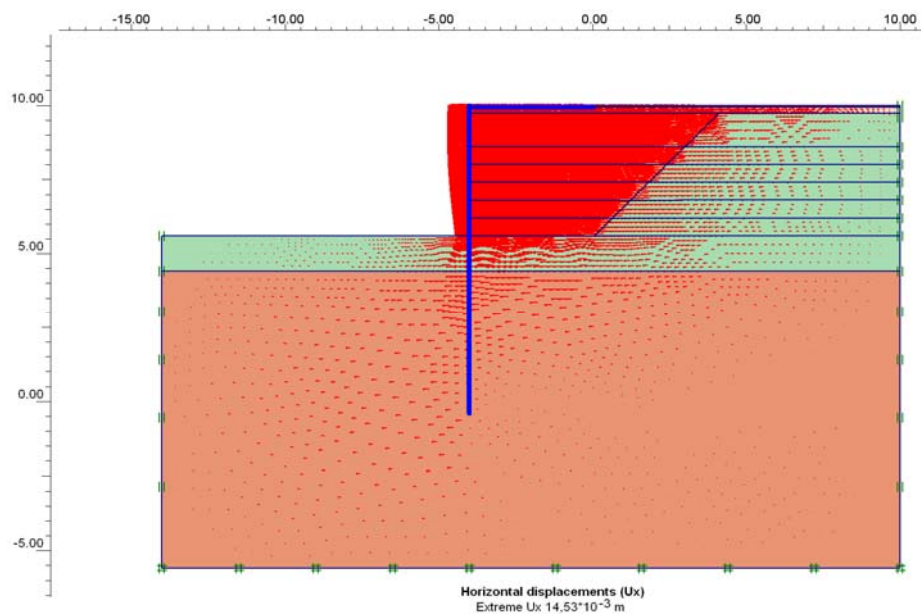


Рис. 4. Горизонтальные перемещения несущей конструкции устоя с засыпкой из фиброармированного песка

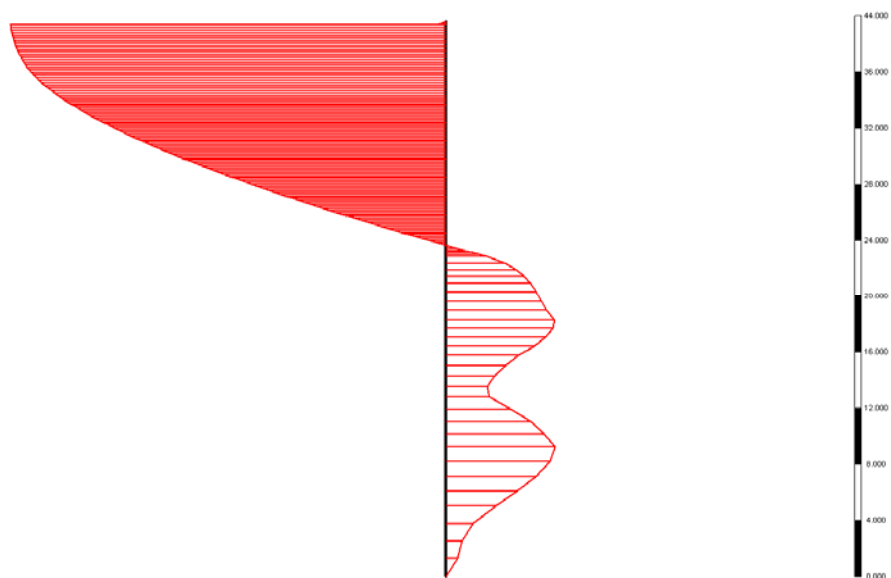


Рис. 5. Эпюра изгибающего момента в несущей конструкции устоя с засыпкой из фиброармированного песка

## Результаты расчета конструкций устоя моста

Тип конструкции	Максимальное горизонтальное перемещение, мм	Максимальный изгибающий момент, кН/м
Песок без армирования	17,56	50,11
Песок, армированный полипропиленовым фибровым волокном в количестве 5 %	14,53	29,53
Песок, армированный горизонтальными прослойками	0*	0*

\* Результаты расчета армогрунтового устоя приведены из работы [14].

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Применение армирования позволяет значительно снизить величину горизонтального давления на подпорные конструкции, а при горизонтальном армировании геосинтетическими прослойками – полностью компенсировать его.

2. Использование фиброармированного песка позволяет значительно уменьшить горизонтальное давление на подпорные конструкции: изгибающий момент уменьшается в 1,7 раза, а горизонтальное перемещение – в 1,2 раза.

### Библиографический список

1. Клевко В.И. Исследование работы армированных глинистых оснований // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 101–110.

2. Клевко В.И. Применение геосинтетических материалов в дорожном строительстве в условиях Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 114–123.

3. Клевко В.И. Оценка величины осадки фундамента на глинистых основаниях, армированных горизонтальными прослойками // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 1. – С. 89–98.

4. Tatyannikov D.A., Ponomarev A.B., Kleveko V.I. Analysis of changes in strength characteristics of geosynthetics during its operation // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. – 2015. – № 1 (25). – С. 7–14.

5. Соколова В.Д., Клевко В.И. Применение метода конечных элементов для моделирования работы покрытия городской площади из брусчатки на армо-



грунтовым основании // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2014. – № 4. – С. 77–89.

6. Tatyannikov D.A., Kleveko V.I. Analysis of changes in the strength characteristics in operation // 10th International Conference on Geosynthetics. – Berlin, 2014. – Vol. 4.

7. Ponomarev A., Zolotozubov D. Several approaches for the design of reinforced bases on karst areas // Geotextiles and Geomembranes. – 2014. – No. 42. – P. 48–51.

8. Ponomarev A.B., Kleveko V.I., Zolotozubov D.G. Experience of geosynthetical material application for karst danger reduction of building base // 9th International Conference on Geosynthetics «Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World». – Berlin, 2010. – P. 2005–2008.

9. Методы строительства армогрунтовых конструкций: учеб.-метод. пособие / В.Г. Офрихтер, А.Б. Пономарев, В.И. Клевеко, К.В. Решетникова. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 145 с.

10. Ehrlich M., Becker L. Reinforced soil walls and slopes: design and construction. – Sao Paulo: Oficina de Textos, 2010. – 152 p.

11. Соколова В.Д., Клевеко В.И. Основные положения по расчету армогрунтового устоя моста // Будущее науки – 2014: сб. науч. ст. 2-й междунар. молодежной науч. конф.: в 3 т. – Курск, 2014. – Т. 2. – С. 236–239.

12. Соколова В.Д., Клевеко В.И. Экономическое обоснование применения армированного грунта в конструкциях устоев мостов // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: материалы V междунар. науч.-практ. конф., Сев. Чарльстон (США), 22–23 декабря 2014 г. – Сев. Чарльстон, 2015. – Т. 1. – С. 85–87.

13. Соколова В.Д., Клевеко В.И. Применение армированного грунта в конструкции устоев моста // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика. – 2014. – № 1. – С. 367–373.

14. Чепулис А.З., Шахвердиева В.Р., Клевеко В.И. Анализ внутренней устойчивости армогрунтовых подпорных стен на воздействие строительных нагрузок от уплотняющих машин // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – С. 508–514.

15. Синани К.Л., Соловьева О.В., Клевеко В.И. Расчет внешней устойчивости армогрунтовых подпорных стен и откосов, армированных георешетками // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – С. 479–484.

16. Кузнецова А.С., Офрихтер В.Г. Оценка прочности фиброармированного песка по результатам испытаний на трехосное сжатие // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2012. – № 2. – С. 37–44.

17. Кузнецова А.С., Офрихтер В.Г., Пономарев А.Б. Исследование прочностных характеристик песка, армированного дискретными волокнами полипропилена // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2012. – № 1. – С. 44–55.

18. Пономарев А.Б., Кузнецова А.С., Богомолова О.А. Результаты исследований фиброармированного песка // Актуальные проблемы геотехники: сб. статей, посвященный 60-летию проф. А.Н. Богомолова. – Волгоград, 2014. – С. 140–147.

19. Гришина А.С., Пономарев А.Б. Исследование прочностных характеристик глинистого грунта, усиленного фибровым армированием // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: материалы междунар. науч.-техн. конф. (г. Новочеркасск, 13–15 мая 2015 г.) / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. – Новочеркасск, 2015. – С. 282–287.

## References

1. Kleveko V.I. Issledovanie raboty armirovannykh glinistykh osnovanij [Research work reinforced clay bases]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 4, pp. 101–110.

2. Kleveko V.I. Primenenie geosinteticheskikh materialov v dorozhnom stroitel'stve v usloviyakh Permskogo kraja [The use of geosynthetics in road construction in the conditions of the Perm region]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, no. 1, pp. 114–123.

3. Kleveko V.I. Otsenka velichiny osadki fundamenta na glinistykh osnovaniyakh, armirovannykh gorizontalnymi proslojkami [An estimate of the deformations of the foundation on the basis of clay reinforced with horizontal layers]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhayushchej sredy, transport, bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2012, no. 1, pp. 89–98.

4. Tatyannikov D.A., Ponomarev A.B., Kleveko V.I. Analysis of changes in strength characteristics of geosynthetics during its operation. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2015, no. 1 (25), pp. 7–14.

5. Sokolova V.D., Kleveko V.I. Primenenie metoda konechnykh elementov dlya modelirovaniya raboty pokrytiya gorodskoj ploshchadi iz bruschatki na armogruntovom osnovanii [Application of the finite element method for modeling work covering the town square of paving stones on reinforced soil bases]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*, 2014, no. 4, pp. 77–89.

6. Tatyannikov D.A., Kleveko V.I. Analysis of changes in the strength characteristics in operation. *10th International Conference on Geosynthetics*. Berlin, 2014. Vol. 4.

7. Ponomarev A., Zolotozubov D. Several approaches for the design of reinforced bases on karst areas. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, no. 42, pp. 48–51.

8. Ponomarev A.B., Kleveko V.I., Zolotozubov D.G. Experience of geosynthetic material application for karst danger reduction of building base. *9th International Conference on Geosynthetics «Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World»*. Berlin, 2010, pp. 2005–2008.

9. Ofrikhter V.G., Ponomarev A.B., Kleveko V.I., Reshetnikova K.V. Metody stroitel'stva armogruntovykh konstruksij [Methods for the construction of reinforced soil structures]. Perm, 2010. 145 p.

10. Ehrlich M., Becker L. Reinforced soil walls and slopes: design and construction. Sao Paulo: Oficina de Textos, 2010, pp. 89–93.

11. Sokolova V.D., Kleveko V.I. Osnovnye polozheniya po raschetu armogrunto- vogo ustoya mosta [The main provisions for the calculation of reinforced soil bridge abutment]. *Sbornik nauchnykh statej 2-j Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferentsii «Budushchee nauki – 2014»*. Kursk, 2014, pp. 236–239.

12. Sokolova V.D., Kleveko V.I. Ekonomicheskoe obosnovanie primeneniya armirovannogo grunta v konstruktivnykh ustoev mostov. *Materialy V mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktualnye napravleniya fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy»*. North Charleston, 2015, vol. 1, pp. 85–87.

13. Sokolova V.D., Kleveko V.I. Primenenie armirovannogo grunta v konstruktivnykh ustoev mosta [Application of reinforced soil structure of the bridge abutments]. *Ekologiya i nauchno-tekhnicheskij progress. Urbanistika*, 2014, no. 1, pp. 367–373.

14. Chepulis A.Z., Shakhverdieva V.R., Kleveko V.I. Analiz vnutrennej ustojchivosti armogruntovykh podpornykh sten na vozdejstvie stroitelnykh nagruzok ot uplotnyayushchikh mashin [Analysis of internal stability of reinforced retaining walls on the ground impact loads from the building sealing machines]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse»*, Perm, 2015, pp. 508–514.

15. Sinani K.L., Solovyeva O.V., Kleveko V.I. Raschet vneshnej ustojchivosti armogruntovykh podpornykh sten i otkosov, armirovannykh georeshetkami [The calculation of external stability of reinforced retaining walls and ground slope reinforced by geogrid]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse»*, Perm, 2015, pp. 479–484.

16. Kuznetsova A.S., Ofrikhter V.G. Otsenka prochnosti fibroarmirovannogo peska po rezul'tatam ispytaniy na trekhosnoe szhatie [Estimation of strength fiber reinforced sand on the results of triaxial tests]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2012, no. 2, pp. 37–44.

17. Kuznetsova A.S., Ofrikhter V.G., Ponomarev A.B. Issledovanie prochnostnykh kharakteristik peska, armirovannogo diskretnymi voloknami polipropilena [Investigation of the strength characteristics of sand reinforced with polypropylene discrete fibers]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitelstvo i arkhitektura*, 2012, no. 1, pp. 44–55.

18. Ponomarev A.B., Kuznetsova A.S., Bogomolova O.A. Rezul'taty issledovaniy fibroarmirovannogo peska [The results of studies of fiber reinforced sand]. *Aktualnye problemy geotekhniki*. Volgograd, 2014, pp. 140–147.

19. Grishina A.S., Ponomarev A.B. Issledovanie prochnostnykh kharakteristik glinistogo grunta, usilennogo fibrovym armirovaniem [Study of the strength characteristics of clayey soil reinforced by fiber reinforcement]. *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy-tekhnicheskoy konferentsii «Mekhanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroenii»*. Yuzhno-Rossijskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet. Novocherkassk, 2015, pp. 282–287.

Получено 30.10.2015

V. Kleveko, K. Kashapova

**USING FINITE ELEMENT METHOD TO SIMULATE  
RETAINING STRUCTURES WITH FIBER  
REINFORCED SOILS BACKFILLING**

Retaining structures are widely used in urban construction as retaining walls, fences, trenches, bridge abutments with vertical tapping the walls, and other constructions. The bridge abutment – an important element of the bridge, which provides an interface of bridge and approach embankments. All retaining structures, including bridge abutments, perceive a significant horizontal pressure, so its reduction allows to reduce the cost of building such structures. In order to reduce the horizontal earth pressure there is possible by increasing the strength soil characteristics of the backfill retaining structures. There are many methods to do this, one of the most promising is soil reinforcement. Recently, a new type of soil reinforcement – fiber reinforcement, that is the use of short reinforcing elements made of synthetic fibers, uniformly distributed in the soil body. Application fiber reinforcement can significantly increase the value of the strength characteristics of soils (especially for the cohesion of soil).

To assess the impact fiber reinforcement work retaining structures was carried out computer modeling of the bridge abutment with the vertical walls. Bridge abutments, as a retaining structure, have a complex stress-strain state, which is most convenient to study the finite element method. The calculations used the software PLAXIS, which implements the finite element method.

The article presents the results of a calculation reinforced soil retaining structure by using fiber reinforcement. A comparison of the use cases is made as backfilling, conventional and fiber reinforcement sand. Analysis of the results showed that the use of fiber reinforced sand reduces horizontal pressure on the retaining structure up to 1,7 times.

**Keywords:** retaining structures, bridges, bridge abutment, finite element method, reinforced soil structures, reinforcing layers, geosynthetics, fiber reinforcement, fiber.

*Клевеко Владимир Иванович (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vlivkl@mail.ru).*

*Кашапова Катарина Равилевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: katenka789@yandex.ru).*

***Kleveko Vladimir*** (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: vlivkl@mail.ru).

***Kashapova Katarina*** (Perm, Russian Federation) – Undergraduate student, Department of Construction Technology and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: katenka789@yandex.ru).