УДК 51-7:625.856

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УГЛА ОСЫПАНИЯ СКЛОНОВ МЕТОДОМ ИЗЛИШНИХ ФИГУР ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЗАЩИТНЫХ ЩЕБЕНОЧНО-ПОЛИУРЕТАНОВЫХ СЛОЕВ

Инженер **В.Ю. Леонтьев**
(АО «ОргСинтезРесурс»),
д-р техн. наук, профессор **А.В. Кочетков**,
канд. техн. наук, доцент **Л.В. Янковский**,
аспирант **В.Ю. Задворнов**
(Пермский национальный
исследовательский
политехнический университет),
канд. техн. наук. **И.Г. Шашков**
(Военный учебно-научный центр
Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и
Ю.А. Гагарина»)
Конт. информация: soni.81@mail.ru

Статья касается укрепления насыпных щебеночных слоев на конусах мостов, откосах дорог, оголовках водопропускных труб, обочинах и других конструкций транспортных сооружений, подвергающихся механическим и температурным воздействиям, путем повышения связанности между зернами щебня и полиуретановым вяжущим. Определены требования к конструкции укрепления полиуретаном с помощью разработанной компьютерной программы на основе метода избыточных треугольников.

***Ключевые слова**: автомобильные дороги, конуса мостов, откосы, полиуретановые композитные составы, наполнители, защитные покрытия, укрепление, ремонт, инновации, коэффициент вариации, угол осыпания склонов, метод излишних фигур, расчет.*

На современном этапе перед дорожным хозяйством России стоит задача применения эффективных полимерных композиционных материалов отечественного производства, что отражено в таких документах, как «Программа внедрения композиционных материалов, конструкций и изделий из них в области транспорта» (утв. распоряжением Министерства транспорта РФ от 11 сентября 2013 г. № МС-91-р), «Программа Федерального дорожного агентства по внедрению композиционных ма-

териалов (композитов), конструкций и изделий из них на 2015-2020 гг.» и др.

В настоящее время увеличение срока службы защитных слоев транспортных сооружений является актуальным, поскольку повсеместно возникает необходимость их ремонта, что обуславливает повышенные требования к конструктивным решениям и качеству материалов.

Укрепление щебеночных слоев на конусах мостов, откосах дорог, оголовках водопропускных труб, обочинах и других конструкциях транспортных сооружений, подвергающихся механическим и температурным воздействиям различной природы, выполняют путем повышения связанности между зернами щебня и вяжущим, в частности полиуретановым **[1]**.

При этом технология устройства конструкции из зернового материала и полиуретанового вяжущего позволяет повысить несущую способность за счет улучшения условий отвода воды и воздуха, увеличения удерживающей способности зерен щебня и повышения механических свойств слоя фракционированного щебня путем образования гибкой каркасной структуры из вяжущего в виде оболочек и нитей, не зависящей от вида и кислотно-щелочных свойств зернового элемента. Это обусловлено тем, что каркасная структура из вяжущего за счет его технологических и эксплуатационных свойств способствует образованию стабильной геометрической и прочностной однородности функциональных свойств слоя из зерновых элементов и устойчивости конструкции. Это приводит к образованию в слое зерновых элементов множества взаимосвязанных пустот, которые, не уплотняя и не закупоривая грунт под ней, способствуют своевременному водоотведению и воздухопроницаемости, формированию свойства слоя зерновых элементов как «пассивного насоса», снижающего до минимума поровое давление в укрепляемой среде «грунт-жидкость» **[2]**.

При этом полученная гибкая пористая структура слоя зерновых элементов выполняет функцию дренирующих прослоек и армирования слоя, так как не задерживает на поверхности влагу, ее эластичные свойства в связанном состоянии позволяют улучшить его амортизационные характеристики, повышая стабильность укрепительных сооружений в широком диапазоне воздействующих факторов, в том числе типичных климатических температур наружного воздуха, атмосферных осадков, противогололедных материалов и др. **[3,4]**.

Кроме того, гибкая каркасная структура оснований и покрытий обеспечивает прочность конструкции за счет перераспределения верти-

кальной нагрузки на нижележащие слои. Это расширяет функциональные и технологические возможности проектирования и устройства конструкционного слоя транспортного сооружения, позволяет обеспечить его однородные свойства по геометрическим параметрам и напряженно-деформированному состоянию.

Требования к конструкции укрепления полиуретановым вяжущим определяются на основе разработанной компьютерной программы оценки эффективности повышения локальной и поверхностной устойчивости конусов мостов и откосов автомобильных дорог.

Глубина нанесения полиуретанового вяжущего – согласно требованиям (на весь слой щебня до геосинтетического материала), но не более 12 см.

Цель представленного в данной статье исследования заключалась в разработке упрощенной методики расчета угла осыпания насыпных щебеночных слоев методом излишних фигур при проектировании защитных щебеночно-полиуретановых покрытий.

Известно следующее свойство сыпучих материалов: склоны не осыпаются, если угол склона не превышает величину угла внутреннего трения (φ_o) сыпучего материала (**рис. 1 а**). Если приложить внешнюю распределенную нагрузку и угол откоса не превышает угол внутреннего трения, то откос не осыпается, независимо от величины нагрузки (**рис. 1**), при условии, что величина нагрузки не выше условия прочности материала[1].

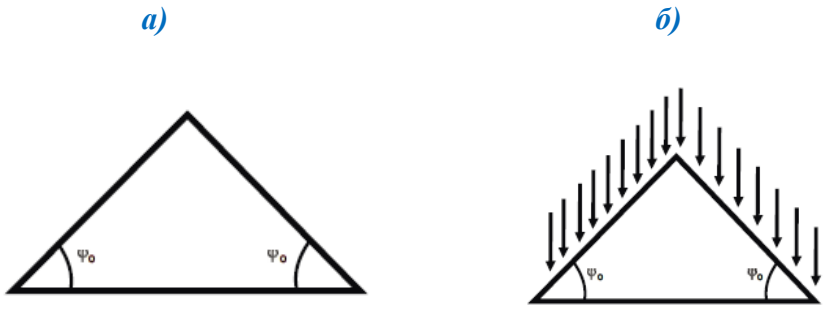


Рис. 1. Конус с углом внутреннего трения:
а – свободный, б – под внешней нагрузкой

[1] Этот закон для сыпучих тел установлен Ш. Кулоном в 1773 г.

В транспортном строительстве такое свойство может быть использовано для определения допустимого угла насыпи (**рис. 2**). Если угол φ не превышает угла внутреннего трения, то насыпь выдерживает любые нагрузки от транспортных средств (ТС), без разрушения и осыпания, в случае превышения угла внутреннего трения осыпается даже без внешнего воздействия.

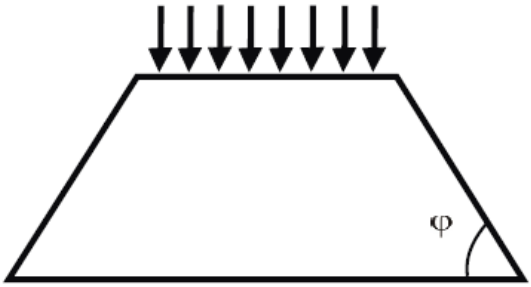


Рис. 2. Воздействие нагрузок от ТС на насыпь

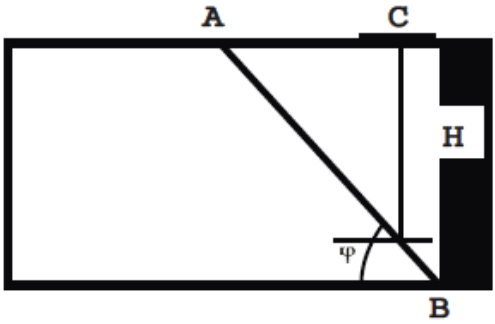
Свойство используется для расчета объемов терриконов и свободных отвалов. Применяя его, можно вести расчеты подпорных стен, вертикальных (**рис. 3 а**) и наклонных (**рис. 3 б**).

Обязательное условие надежности таких расчетов – это то, что грунт должен быть сыпучим и несвязным, например песок, щебень, гравий и т.д.

Для транспортных сооружений основой является земляное полотно (уплотненное, укрепленное), на которое укладывается щебеночный слой. Методы проектирования земляного полотна известны, например **[5-7]**, между тем они отличаются достаточной сложностью и не ориентированы на оценку устойчивости и эффективности применения насыпных щебеночных слоев. Оценим возможность использования теории сыпучей среды для определения углов осыпания этих слоев на примерах насыпей и терриконов.

При строительстве автомобильных дорог ситуации, связанные с осыпанием слоев покрытий могут возникать, особенно при использовании местных материалов. В ряде случаев из-за влияния механических и климатических воздействий может происходить разуплотнение используемых грунтовых сред и переход их в сыпучее состояние, например, при высыхании в летний период. Такие ситуации являются нарушением безопасного состояния конструкции и требуют оценки эффективности применения защитных насыпных щебеночных покрытий на основе упрощенных методов расчета.

а)



б)

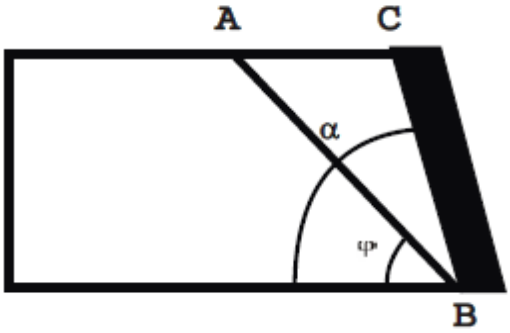


Рис. 3. Подпорные стенки:
а – вертикальная, б – наклонная
Н – значение высоты насыпи на текущем уровне

Метод излишних фигур (масс) **[7-9]** следует из указанного свойства сыпучих материалов. Используя свойство сыпучих тел, можно составить формулы для расчетов эпюры напряжений от давления насыпи на подпорную стену. Согласно закону Кулона, насыпь левее прямой АВ при отсутствии внешних нагрузок не действует на подпорную стенку, на нее действует только насыпь, заключенная в треугольном клине АВС. Определение расчетной схемы производится на основе метода излишних фигур (избыточных треугольников) **[7-9]**.

Для вертикальной стены вес «излишней фигуры» определяется по формуле:

$$P = \frac{1}{2}\gamma g H^2 l \, ctg\,\varphi \quad ,$$

где

γ – удельный вес материала насыпи;
H – высота насыпи (равная высоте стенки);
l – длина насыпи (стенки) в плане;
φ – угол внутреннего трения;
$g = 9{,}81$ м/с^2.

Для наклонной стены:

$$P = \frac{1}{2}\gamma g H^2 l \, (ctg\,\alpha - ctg\,\varphi) \quad .$$

здесь α – угол наклона подпорной стенки.

Из закона Кулона следует, что сила, вызывающая скольжение, равна:

$$F = \frac{P}{\sin\varphi} \quad .$$

Чтобы определить нагрузку на элементарный участок стены воспользуемся схемой на **рис. 4**.

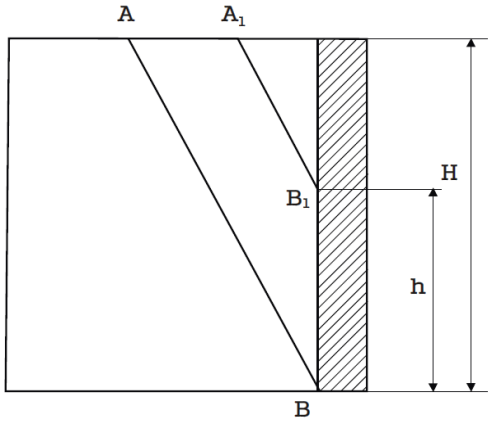


Рис. 4. Схема расчета сил, действующих на элементарный участок подпорной стенки

На **рис. 4** приведена схема расчета сил, действующих на подпорную стенку на высоте h_i. На высоте h_i на подпорную стенку действует сила веса насыпи в треугольнике A_iB_iC. Отсюда следует, что на высоте h_i на подпорную стенку действует сила, определяемая по формуле:

$$P = \frac{1}{2}\frac{\gamma g H^2 l \, ctg\,\varphi}{\sin\varphi} \quad .$$

Аналогично для наклонной стенки:

$$F = \frac{1}{2}\frac{\gamma g H^2 l \, (ctg\,\alpha - ctg\,\varphi)}{\sin\varphi} \quad .$$

Давление на элементарный участок вертикальной подпорной стенки (площадью $l\Delta h$) определяется по формуле:

$$\sigma_i = \frac{\gamma g (H - h_i)^2 \, ctg\,\varphi}{2\Delta h \sin\varphi} \quad .$$

Для наклонной стенки аналогично:

$$F = \frac{\gamma g (H - h_i)^2 \, (ctg\,\alpha - ctg\,\varphi)}{2\Delta h \sin\varphi} \quad ,$$

где Δh – высота элементарного участка стенки.

Решим задачу об определении напряжений в укрепляющем слое конусного террикона, угол которого больше, чем угол внутреннего трения (**рис. 5**).

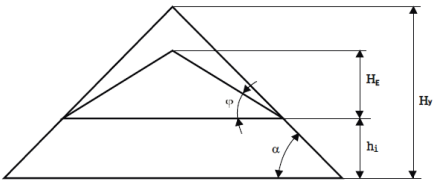


Рис. 5. Террикон с укрепленными стенками:
φ – угол внутреннего трения;
α – угол укрепленной стенки;
H_E – высота естественного террикона;
$H_У$ – высота укрепленного террикона

На укрепляющие стенки действует только масса, лежащая выше естественного террикона (излишняя масса). Масса, заключенная внутри естественного террикона, на стенки влияния не оказывает.

Сила давления равна весу излишней фигуры, деленная на *sin φ*:

$$F_i = \frac{P_i}{\sin\varphi} \quad .$$

Объем излишней фигуры запишем в виде уравнения:

$$V = \frac{\pi R_i^2 H_O}{3} - \frac{\pi R_i^2 H_i}{3} = \frac{\pi R_i^2 (R_i\, tg\alpha)}{3} - \frac{\pi R_i^2 (R_i\, tg\varphi)}{3} = \frac{\pi R_i^3 [tg\alpha - tg\varphi]}{3} \quad .$$

Вес излишней фигуры определяется следующей формулой:

$$P = V\gamma g = \frac{\pi\gamma g R_i^3 [tg\alpha - tg\varphi]}{3} \quad .$$

Схема расчета усилий на укрепляющую стенку приведена на **рис. 6**.

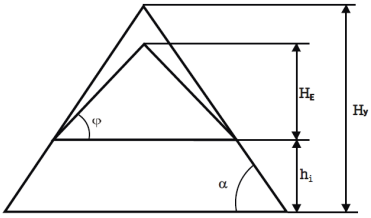


Рис. 6. Схема расчета усилий на укрепляющую стенку

Аналогично определяются напряжения на элементарном участке укрепляющей стенки. На каждую элементарную площадку стенки давит вся масса излишней фигуры:

$$\sigma = \frac{F_i}{S_i} = \frac{1/3\,\pi\gamma g R_i^3 [tg\alpha - tg\varphi]}{2\pi R_i\, \Delta h \sin\varphi} = \frac{\gamma g R_i^2 (tg\alpha - tg\varphi)}{6\Delta h \sin\varphi} \quad ,$$

где

H – высота конуса;

h – высота расчета давления;

Δh – высота элементарной площадки;

R_i – радиус основания конуса на высоте расчета давления:

$$R_i = \frac{H - h_i}{tg\alpha} \quad ,$$

где

α – угол конуса.

Площадь элементарной площадки давления вычисляется по формуле:

$$S_i = 2\pi R \, \Delta h \quad .$$

Для расчета угла осыпания склонов был разработан программный комплекс на языке Си.

Приведем пример расчета угла осыпания насыпных щебеночных слоев на склонах.

Расчетный пример

Согласно Пособию к СП 52-101-2003, имеем допустимое напряжение на растяжение величиной 1,75 МПа (17,8 кг/см^2).

Доломитовый щебень:

1. *Угол внутреннего трения = 38°.*
2. *Удельный вес 1,3 т/м^3.*

На второй вкладке вводим начальные данные:

1. *Угол внутреннего трения – 38°.*
2. *Удельный вес (доломита) – 1,3 т/м^3.*
3. *Радиус основания 10 м (для примера).*
4. *Допустимые напряжения в укрепляющей стенке – 1,75 МПа.*

Согласно расчетам по второй вкладке программы, при радиусе основания конуса 10 м получен максимально возможный угол конуса, равный 42°.

В процессе отладки программного комплекса проведена корректировка алгоритмического и программного обеспечения. При этом получены следующие данные:

– высота насыпного конуса – более 9 м;

– масса насыпного материала – более 1225 т.

Для проверки проверим напряжения в укрепляющей стенке, на первой вкладке вводим начальные данные (**рис. 7**):

1. *Угол внутреннего трения – 38°.*
2. *Угол укрепленного конуса – 42°.*
3. *Удельный вес материала – 1,3 т/м³.*

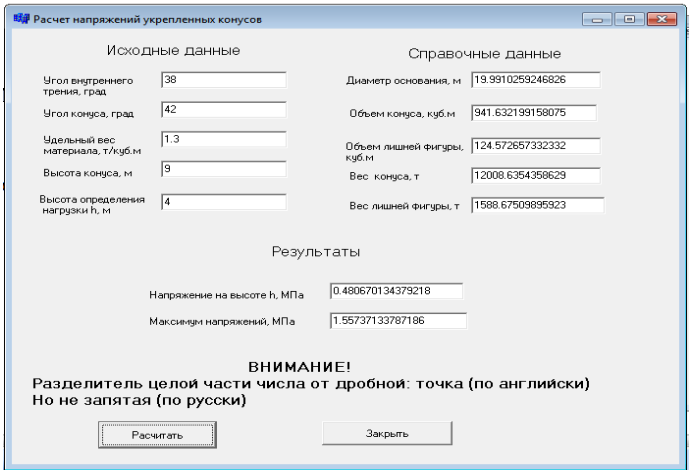


Рис. 7. Результаты расчета максимально допустимого угла конуса

Таким образом, максимум напряжения в укрепляющей стенке равен 1,55 МПа, что удовлетворяет требованиям прочности материала стенки (**рис. 8**).

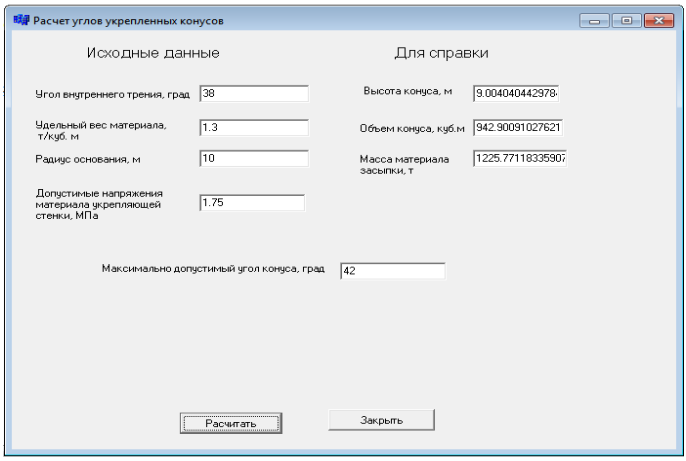


Рис. 8. Результаты проверки максимума напряжений

Результаты расчета в программном комплексе приведены на **рис. 9**.

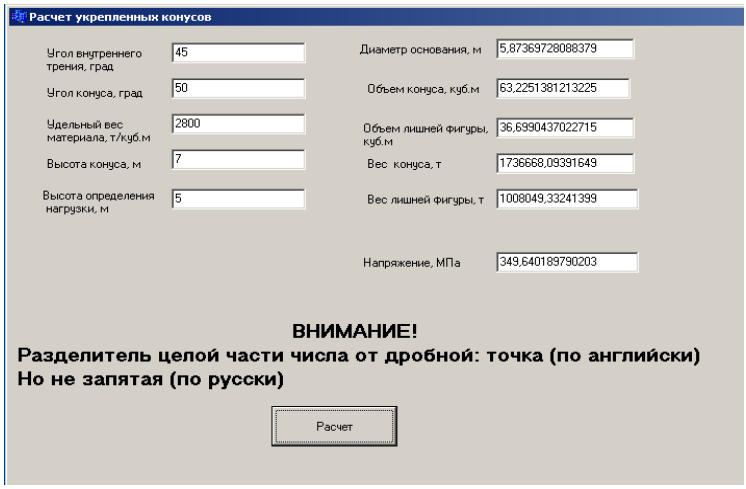


Рис. 9. Расчет укрепленных конусов

Новизна разработанных технических решений подтверждена патентами Российской Федерации **[11,12]**.

ВЫВОДЫ

1. Впервые разработан упрощенный метод расчета угла осыпания насыпных щебеночных слоев методом излишних фигур при проектировании защитных щебеночно-полиуретановых покрытий.
2. На основе применения программного комплекса и результатов типовых расчетов получены практические рекомендации по проектированию защитных щебеночно-полиуретановых покрытий:
   - базовым показателем является угол внутреннего трения;
   - расчет проводился относительно худшего состояния склона (сухого зернистого состояния);
   - применение защитных щебеночно-полиуретановых слоев позволяет увеличить угол откоса относительно угла внутреннего трения на 4° без риска нарушения устойчивости склона;
   - для углов, больших суммы угла внутреннего трения материала грунта откоса и 4°, рекомендуется использование геосеток.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Леонтьев В.Ю. Полиуретановые покрытия / В.Ю. Леонтьев // Автомобильные дороги. – 2016. – № 5. – С. 78-83.*
2. *Леонтьев В.Ю. Укрепление откосов земляных сооружений. Вяжущий материал на основе двухкомпонентной полиуретановой системы ДОРОЛИТ / В.Ю. Леонтьев // Новые технологии в строительстве. – 2016. – №1. – С. 14-31.*
3. *Леонтьев В.Ю. Применение вяжущего материала на основе полиуретана для укрепления и ремонта защитных покрытий транспортных сооружений / В.Ю. Леонтьев // Транспортное строительство. – 2016. – № 1. – С. 7-10.*
4. *Леонтьев В.Ю. Методы ремонта щебеночных конструкций, армированных объемными георешетками на конусах мостовых сооружений и откосах автомобильных дорог / В.Ю. Леонтьев, Н.Е. Кокодеева // Дороги. Инновации в строительстве 2015. – № 43. – С. 74-78.*
5. *ОДМ 218.2.006-2010. Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению оползневых*

давлений на инженерные сооружения автомобильных дорог – утв. Распоряжением ФДА № 249-р от 30.03.2011. – М., 2010. – 116 с. – Электрон. данные. – URL: http://meganorm.ru/Index2/1/4293807/4293807223.htm (дата обращения 11.11.2016).

6. *ОДМ 218.2.027-2012. Методические рекомендации по расчету и проектированию армогрунтовых подпорных стен на автомобильных дорогах. – Изд. на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 26.11.2012 N 890-р. – М., 2013. – 63 с. – Электрон. данные. – URL: http://meganorm.ru/Index2/1/4293778/4293778957.htm (дата обращения 11.11.2016).*

7. *ОДМ 218.2.049-2015. Рекомендации по проектированию и строительству габионных конструкций на автомобильных дорогах. – Изд. на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 17.08.2015 N 1468-р. – М., 2015. – 107 с. – Электрон. данные. – URL: https://rosexpertpravo.ru/law/Data2/1/4293759/4293759628.pdf (дата обращения 11.11.2016).*

8. *Приказ Минтранса РФ от 19.07.1993 № 33 «О введении в действие «Правил безопасности морской перевозки незерновых навалочных грузов».*

9. *Палькин Ю.С. Проектирование земляного полотна на подходах к мостам и тоннелям / Ю.С. Палькин. – Новосибирск: СГУПС, 2002. – 48 с.*

10. *Клейн Г.К. Расчет подпорных стенок / Г.К. Клейн. – М.: Высшая школа, 1964. – 196 с.*

11. *Пат.155397 РФ, E01C 3/00(2006/01). Конструкция покрытия транспортного сооружения / Кочетков А.В., Кокодеева Н.Е., Леонтьев В.Ю., патентообладатель АО «ОргСинтезРесурс». – № 2015101331/03(001897). Заявл. 19.01.2015. Опубл. 10.10.2015. – Бюл. 28. – 2 с.*

12. *Пат. 2593506 РФ, E01C 3/00 (2006/01). Способ устройства конструкции основания и/или покрытия транспортного сооружения / Кочетков А.В., Кокодеева Н.Е., Леонтьев В.Ю., патентообладатель АО «ОргСинтезРесурс». – № 2015101325/03(001890). Заявл. 19.01.2015. Опубл. 10.08.2016. – Бюл. 22. – 13 с.*

L I T E R A T U R A

1. *Leont'ev V.Ju. Poliuretanovye pokrytija / V.Ju. Leont'ev // Avtomobil'nye dorogi. – 2016. – # 5. – S. 78-83.*

2. *Leont'ev V.Ju. Ukreplenie otkosov zemljanyh sooruzhenij. Vjazhushhij material na osnove dvuhkomponentnoj poliuretanovoj sistemy DOROLIT / V.Ju. Leont'ev // Novye tehnologii v stroitel'stve. – 2016. – #1. – S. 14-31.*

3. *Leont'ev V.Ju. Primenenie vjazhushhego materiala na osnove poliuretana dlja ukreplenija i remonta zashhitnyh pokrytij transportnyh sooruzhenij / V.Ju. Leont'ev // Transportnoe stroitel'stvo. – 2016. – # 1. – S. 7-10.*

4. *Leont'ev V.Ju. Metody remonta shhebenochnyh konstrukcij, armirovannyh ob"emnymi georeshetkami na konusah mostovyh sooruzhenij i otkosah avtomobil'nyh dorog / V.Ju. Leont'ev, N.E. Kokodeeva // Dorogi. Innovacii v stroitel'stve 2015. – # 43. – S. 74-78.*

5. *ODM 218.2.006-2010. Rekomendacii po raschetu ustojchivosti opolzneopasnyh sklonov (otkosov) i opredeleniju opolznevyh davlenij na inzhenernye sooruzhenija avtomobil'nyh dorog – utv. Rasporjazheniem FDA # 249-r ot 30.03.2011. – M., 2010. – 116 s. – Jelektron. dannye. – URL: http://meganorm.ru/Index2/1/4293807/4293807223.htm (data obrashhenija 11.11.2016).*

6. *ODM 218.2.027-2012. Metodicheskie rekomendacii po raschetu i proektirovaniju armogruntovyh podpornyh sten na avtomobil'nyh dorogah. – Izd. na osnovanii rasporjazhenija Federal'nogo dorozhnogo agentstva ot 26.11.2012 N 890-r. – M., 2013. – 63 s. – Jelektron. dannye. – URL: http://meganorm.ru/Index2/1/4293778/4293778957.htm (data obrashhenija 11.11.2016).*

7. *ODM 218.2.049-2015. Rekomendacii po proektirovaniju i stroitel'stvu gabionnyh konstrukcij na avtomobil'nyh dorogah. – Izd. na osnovanii rasporjazhenija Federal'nogo dorozhnogo agentstva ot 17.08.2015 N 1468-r. – M., 2015. – 107 s. – Jelektron. dannye. – URL: https://rosexpertpravo.ru/law/Data2/1/4293759/4293759628.pdf (data obrashhenija 11.11.2016).*

8. *Prikaz Mintransa RF ot 19.07.1993 # 33 «O vvedenii v dejstvie «Pravil bezopasnosti morskoj perevozki nezernovyh navalochnyh gruzov».*
9. *Pal'kin Ju.S. Proektirovanie zemljanogo polotna na podhodah k mostam i tonneljam / Ju.S. Pal'kin. – Novosibirsk: SGUPS, 2002. – 48 s.*
10. *Klejn G.K. Raschet podpornyh stenok / G.K. Klejn. – M.: Vysshaja shkola, 1964. – 196 s.*
11. *Pat.155397 RF, E01C 3/00(2006/01). Konstrukcija pokrytija transportnogo sooruzhenija / Kochetkov A.V., Kokodeeva N.E., Leont'ev V.Ju., patentoobladatel' AO «OrgSintezResurs». – # 2015101331/03(001897). Zajavl. 19.01.2015. Opubl. 10.10.2015. – Bjul. 28. – 2 s.*
12. *Pat. 2593506 RF, E01C 3/00 (2006/01). Sposob ustrojstva konstrukcii osnovanija i/ili pokrytija transportnogo sooruzhenija / Kochetkov A.V., Kokodeeva N.E., Leont'ev V.Ju., patentoobladatel' AO «OrgSintezResurs». – # 2015101325/03(001890). Zajavl. 19.01.2015. Opubl. 10.08.2016. – Bjul. 22. – 13 s.*

……

CALCULATION METHODOLOGY OF FALLING SLOPE ANGLE USING OF REDUNDANT FIGURES METHOD WHEN DESIGNING PROTECTIVE POLYURETHANE BONDED AGGREGATE LAYERS

*Engineer **V.Yu. Leontiev***
(Joint-stock company «OrgSintezResurs»),
*Doctor of Engineering, Professor **A.V. Kochetkov**,*
*Ph. D. (Tech.), Associate Professor **L.V. Yankovsky**,*
*Postgraduate Student **V.Yu. Zadvornov***
(Perm National Research Polytechnic University),
*Ph. D. (Tech.) **I.G. Shashkov***
(Air Forces Military Educational
and Scientific Center
«Zhukovsky – Gagarin Air Force Academy»)
Contact information: soni.81@mail.ru

The article concerns the strengthening of loose crushed aggregate layers with the use of polyurethane binder at bridge abutments, road slopes, culvert heads, shoulders and other transport structures subjected to mechanical and temperature impact. The requirements for strengthening construc-

tion with polyurethane are determined with the use of the developed software program on the basis of the method of redundant triangles.
***Key words**: roads, bridge abutments, slopes, polyurethane composites, aggregates, protective surface layers, strengthening, repair, innovation, variation coefficient, falling slope angle, redundant figures method, calculation.*

Рецензент: канд. техн. наук А.А. Домницкий (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 03.10.2016 г.