

УДК 625.72

**ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ НАГРУЗКИ НА
НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
КОНСТРУКЦИИ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ**

**INFLUENCE OF LOAD LOCATION ON STRUCTURES
STRESS-STRAIN STATE OF THE ROAD PAVEMENT**

Батракова А.Г., д.т.н., проф., Урдзик С.Н. (Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет)

Batrakova A.G., Doctor of Engineering Sciences, Prof., S.N. Urdzik (Kharkiv National Automobile and Highway University)

Представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции дорожной одежды с подповерхностными и сквозными трещинами в слоях покрытия. Обосновано наиболее опасное положение расчетной нагрузки над Т-образной трещиной.

The results of numerical modeling of stress-strain state of the pavement structure with subsurface and pass-through cracks in the pavement layers are presented. It is proved the most destructive location of the standard load over the T-shaped crack. Research of the stress strain state of pavement structures with subsurface cracks was carried out on five models. As the base models adopted: the model without crack; a model with a single crack and the regional location of the load; model with T-shaped crack and an angular position of the load; model with T-shaped crack and the central location of the load; model with T-shaped crack and the regional location of the load.

Ключевые слова: дорожная одежда, трещина, напряженно-деформированное состояние.

Keywords: road pavement, crack, stress-strain state.

Трещины различной конфигурации, глубины и происхождения являются наиболее характерным видом разрушений дорожных покрытий и представляют основную опасность как начальная стадия

более серьезных разрушений. Впервые попытку оценки изменения модулей конструктивных слоев в зависимости от состояния дорожной одежды с разрушениями предпринял проф. А.К. Бируля [1]. При внедрении ВСН 46-72 [2] на основе экспериментальных данных ХАДИ были предложены понижающие коэффициенты модуля слоя, значения которых зависят от наличия и степени развития деформаций и разрушений [3]. Эти результаты, практически без изменения приняты сейчас в системе управления состоянием покрытия. Проблемы, связанные с трещинами в асфальтобетонном покрытии, исследовали Б.С. Радовский [4], В.А. Золотарев [5], В.В. Мозговой [6], И.И. Леонович [7], В.А. Веренько [8], И.П. Гамеляк [9], Л.Б. Гезенцевей [10], Н.В. Горельшев [11], В.Д. Казарновский [12], А.Е. Мерзликин [13]. Этими проблемами занимались также Д. Пайс и Д. Сауса [15], Э. Оскарсон [16], Р. Литтон [16], Ч. В. Гловер [17], Род Файф [18], М. Кони [19], Аль-Куади [20], Д. Риго [21].

Поскольку строгие аналитические решения для оценки состояния дорожной одежды, содержащей трещины, получены для ограниченного количества модельных задач [22, 23], широкое распространение получил метод конечных элементов (МКЭ). Конструкция рассматривается как некоторая совокупность конструктивных элементов, которые соединены в конечном числе узловых точек. Соотношения теории упругости между силами и перемещениями для каждого элемента позволяют описать свойства и поведение всей конструкции при заданных граничных и начальных воздействиях. Математически это означает отыскание решения краевой задачи как набора функций, определённых на конечных элементах. Компоненты матрицы жесткости определяются координатами узлов элементов и их упругими характеристиками: модулем упругости (E) и коэффициентом Пуассона (ν). Будем рассматривать постановку задачи в рамках такого подхода.

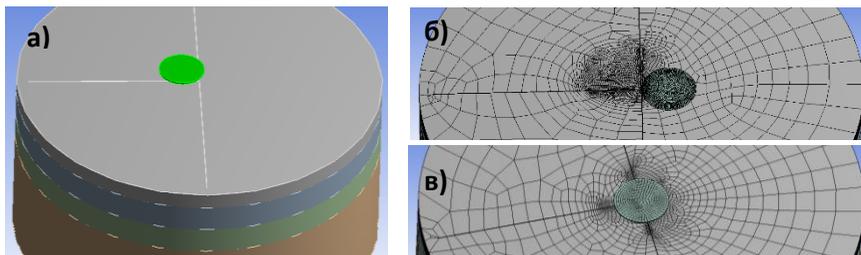
Основной задачей исследования является оценка влияния положения нагрузки относительно трещины на НДС конструкции дорожной одежды. Ранее рассматривались два «предельных» случая: нагрузка (колесо) расположена симметрично относительно трещины; нагрузка расположена по одну сторону от трещины. В качестве модели самой трещины использовался прямолинейный «разрез» правильной прямоугольной формы. Однако, как показали исследования авторов, часто трещины имеют Т-образную форму либо расположены параллельно на незначительном расстоянии (рис.

1). Очевидно, что в этом случае НДС конструкции дорожной одежды будет существенным образом зависеть как от положения нагрузки, так и от вида трещины (сквозная или подповерхностная).



Рис. 1. Примеры Т-образных (а) и повторяющихся (б) трещин в покрытии дорог Харьковской области

Структурные части конечно-элементной модели со сквозной трещиной (рис.2): слои конструкции дорожной одежды – четырехслойная модель, состоящая из слоя покрытия, двух слоев основания, подстилающий грунт; элементы – гексагональные упорядоченные прямоугольные объёмы в каждом слое дорожной конструкции с заданными физическими свойствами материала. По границам рабочего тела заданы граничные условия неподвижности элементов на границе. Общий представительский объем во всех вычислительных экспериментах имел форму цилиндра диаметром 3 м и высотой 1,3 м. Основные параметры модели: толщина, модуль упругости и коэффициент Пуассона слоев дорожной одежды. Ширина раскрытия трещин принята 3 мм.



а) угловое расположение; б) краевое расположение;
в) симметричное расположение

Рис. 2 Модель конструкции дорожной одежды при различном положении нагрузки

В процессе вычислений варьировалось расположение нагрузки относительно трещины и модуль упругости материала слоя покрытия. В качестве основных параметров, характеризующих НДС дорожной одежды при наличии трещин приняты растягивающие напряжения на границах слоев покрытия, сдвигающие напряжения, прогиб под нагрузкой (рис. 3 – 4) [13]. Проведенные расчеты показали, наличие трещины приводит к увеличению максимального прогиба под нагрузкой при ее угловом расположении в 1,92 раза (рис. 3). Максимальные растягивающие напряжения на нижней границе покрытия действуют при краевом приложении нагрузки.

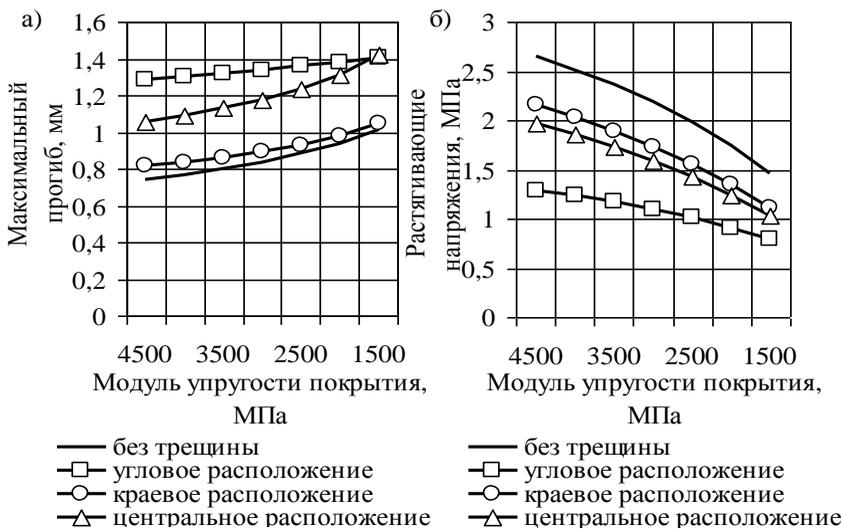


Рис. 3. Изменение максимального прогиба на поверхности покрытия (а) и растягивающих напряжений на нижней границе верхнего слоя конструкции (б) при различном расположении нагрузки

Следует отметить, что наибольшую опасность при наличии сквозной трещины представляют напряжения сдвига на верхней границе основания (рис. 4), возрастающие при угловом расположении нагрузки более чем в два раза относительно центрального расположения нагрузки и практически на порядок относительно конструкций без трещин. Указанный факт следует учитывать при расчете дорожных одежд в проектах ремонта.

Пространственные распределения параметров сосредоточены вблизи границ сингулярностей (ребер трещин) либо в зонах под ними, что согласуется с общими физическими представлениями.

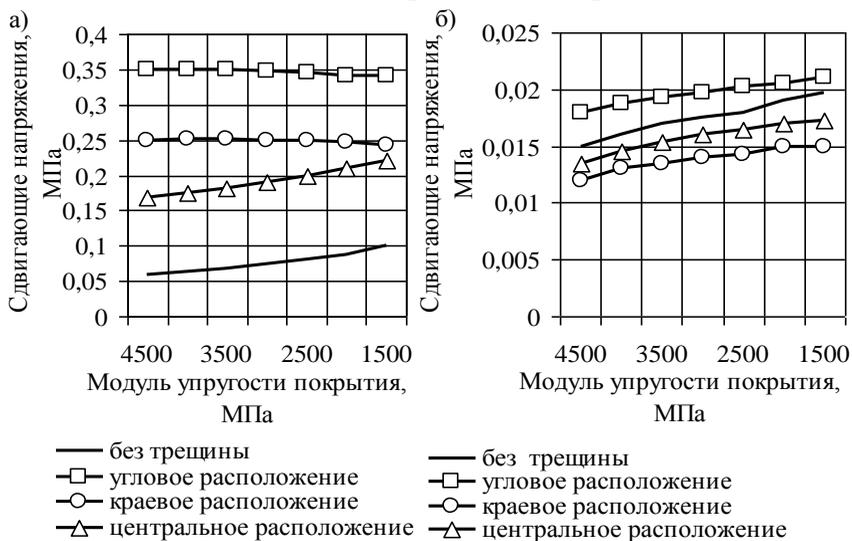
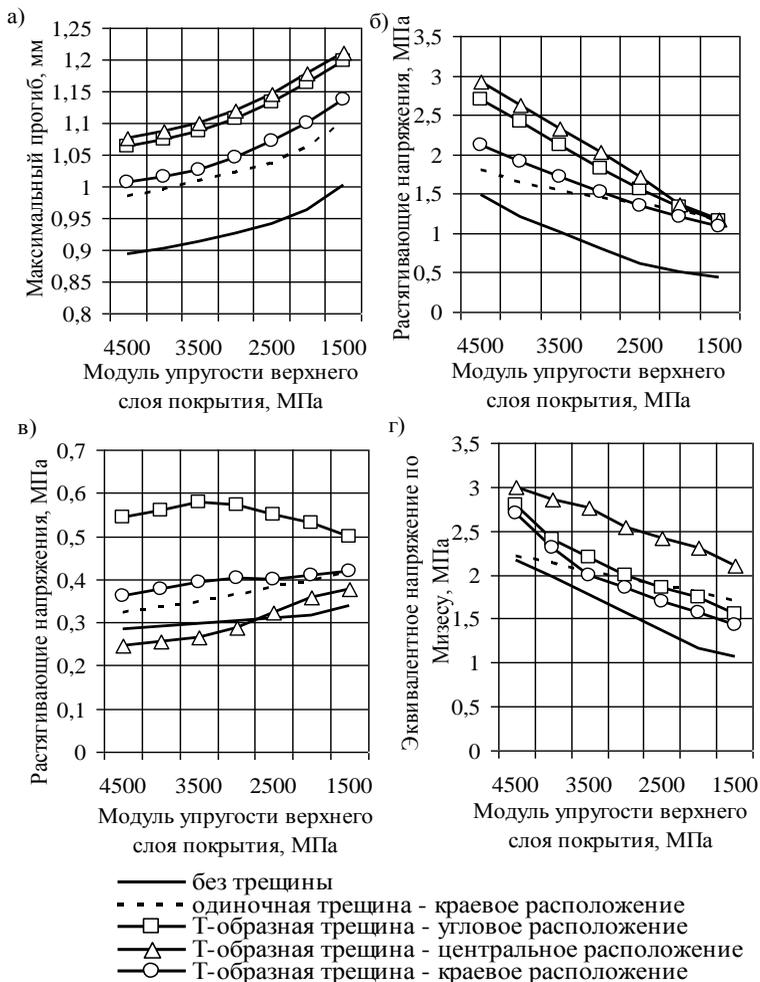


Рис. 4. Изменения напряжений сдвига на верхней границе второго слоя (а) и напряжений сдвига на верхней границе нижнего слоя конструкции (б) при различном расположении нагрузки

Исследование НДС конструкции дорожной одежды с подповерхностными трещинами осуществлялось на пятислойных моделях. В качестве базовых моделей приняты: модель без трещины; модель с одиночной трещиной и краевым расположением нагрузки; модель с Т-образной трещиной и угловым расположением нагрузки; модель с Т-образной трещиной и центральным расположением нагрузки; модель с Т-образной трещиной и краевым расположением нагрузки. Основные параметры моделей: а) толщина слоев (сверху вниз): 1 слой (покрытие) - 5 см., 2 слой (покрытие) - 7 см., 3 слой (основание) - 20 см., 4 слой (основание) - 20 см., 5 слой (подстилающий грунт) - 78 см; б) модуль упругости материала слоев; в) коэффициент Пуассона слоев покрытия - 0,35, слоев основания - 0,30, грунта - 0,32; г) ширина раскрытия трещин принята 0,3 см. Рассчитывались: максимальный прогиб на поверхности, растягивающие напряжения на нижней границе верхнего слоя и на верхней границе нижнего слоя

покрытия, содержащего трещину, а также эквивалентные напряжения (по Мизесу) на нижней границе верхнего слоя покрытия (рис. 5).

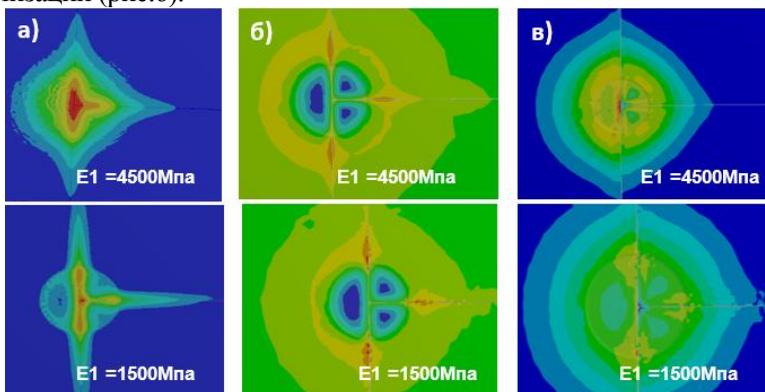


а) максимальный прогиб на поверхности; б) растягивающие напряжения на нижней границе верхнего слоя покрытия; в) растягивающие напряжения на верхней границе нижнего слоя покрытия, г) эквивалентные напряжения (по Мизесу) на нижней границе верхнего слоя покрытия

Рис.5. Параметры НДС конструкции с подповерхностными трещинами

Анализ результатов расчетов свидетельствует, что вид подповерхностной трещины (одиночная либо Т-образная) не существенно влияет на НДС конструкции дорожной одежды. Растягивающие напряжения на нижней границе верхнего слоя покрытия максимальны при центральном расположении нагрузки, тогда как в слое покрытия, содержащего подповерхностную трещину, наиболее опасными являются напряжения, возникающие при угловом расположении нагрузки. Таким образом, положение нагрузки относительно трещины оказывает наиболее существенное влияние для достаточно жестких покрытий, что следует учитывать при расчете усиления дорожной одежды. С уменьшением модуля упругости покрытия положение нагрузки не существенно влияет на изменение НДС конструкции.

Отметим также, что в сложных напряженно-деформированных состояниях, связанных с наличием сингулярностей (ребер трещин) необходимо учитывать главные напряжения ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), либо их эквивалент ($\sigma_{vonMises}$). При анализе НДС конструкции дорожной одежды важную роль играют не только максимальные значения напряжений (деформаций) в отдельных точках, но и площадь их локализации (рис.6).

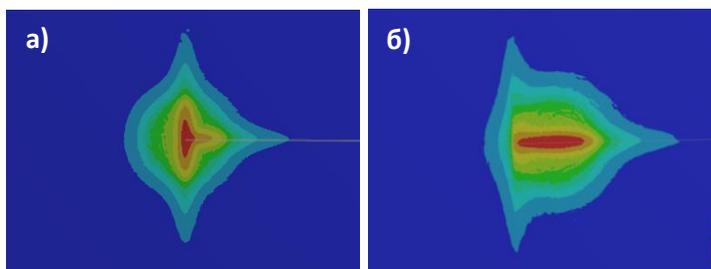


а) растягивающие напряжения на нижней границе верхнего слоя покрытия (вид снизу); б) растягивающие напряжения на верхней границе нижнего слоя покрытия (вид сверху); в) напряжения сдвига на верхней границе нижнего слоя покрытия (вид сверху)

Рис.6. Распределение напряжений при наличии подповерхностной трещины в нижнем слое покрытия

По мере уменьшения модуля упругости материала верхнего слоя покрытия площадь локализации растягивающих напряжений на нижней границе верхнего слоя значительно изменяется (Рис.6). Для слабых материалов (с небольшим модулем) степень локализации выше, а максимальные значения напряжения существенно ниже. В то же время, заметные по величине растягивающие (нормальные) напряжения возникают и во втором слое вблизи ребер и граней трещины. Их локализация слабо зависит от модуля материала верхнего слоя, в то время как распределение сдвигающих напряжений существенно изменяется по мере уменьшения модуля верхнего слоя (рис. 6). При этом картина распределения этих напряжений практически совпадает с распределением эквивалентных напряжений по Мизесу.

Анализ локализации напряжений в конструкции дорожной одежды с подповерхностной трещиной при различном расположении нагрузки (рис. 7) позволил установить, что несимметричное нагружение является наиболее опасным.



- а) при расположении центра нагрузки над точкой пересечения трещин;
б) при смещении нагрузки.

Рис. 7. Распределение растягивающих напряжений на нижней границе верхнего слоя ($E_1 = 4500$ МПа, $E_2 = 1500$ МПа, $E_{\text{трещ}} = 0,1$ МПа, ширина трещин 3мм)

Если растягивающие напряжения на нижней границе верхнего слоя покрытия изменяются незначительно (с $\sigma_1 = 2,78$ МПа для симметричной нагрузки до $\sigma_1 = 2,69$ МПа при смещении нагрузки), то растягивающие и сдвигающие напряжения на верхней границе

второго слоя возрастают более чем в три раза ($\sigma_2 = 0,464$ МПа и $\tau_2 = 0,234$ МПа для симметричной нагрузки до $\sigma_2 = 1,109$ МПа и $\tau_2 = 0,542$ МПа при смещении нагрузки). Следовательно, при разработке проектов ремонта в расчетах конструкции дорожной одежды с трещинами в качестве базовой следует принимать модель с несимметричным расположением нагрузки.

Как показали результаты моделирования НДС конструкции дорожной одежды с трещинами, значительная степень локализации (малая площадь области со значительными напряжениями) приводит к тому, что при незначительных изменениях в геометрии конструкции существенно изменяются и соответствующие напряжения. Применительно к дорожным одеждам это означает, что при скалывании краев трещины или заполнении трещины другим материалом в напряженном состоянии конструкции могут происходить значительные изменения. Очевидно, что эти изменения необходимо учитывать как при оценке текущего состояния конструкции дорожной одежды, так и при разработке проектов ремонтных мероприятий.

1. Бируля А.К. Конструирование и расчет дорожных одежд автомобильных дорог. / А.К. Бируля – М.: Трансиздат, 1964. – 167 с.
2. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. ВСН 46–72. – М.: Транспорт, 1973. – 112 с.
3. Бируля А.К. Работоспособность дорожных одежд / А. К. Бируля, С. И. Михович. - М.: Транспорт, 1968. – 172 с.
4. Радовский Б.С., Мозговой В.В. Температурные напряжения в асфальтобетоне, лежащем на основании с трещинами либо швами / Б.С. Радовский, В.В. Мозговой // Повышение долговечности дорожных конструкций: Тр.Союздорнии М., 1985. – С. 29-45.
5. Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов/ В.А. Золотарев. Харьков: Высшая школа, 1977. – 116 с.
6. Мозговой В.В. Научные основы обеспечения трещиностойкости асфальтобетонных покрытий: дис. ... доктора техн. наук: 05.22.11 / Мозговой Владимир Васильевич. – К., 1996, – 406 с.
7. Диагностика и управление качеством автомобильных дорог: учебное пособие / И.И. Леонович [и др.]. – Минск: БГТУ, 2002. – 357 с.
8. Веренько В.А. Новые материалы в дорожном строительстве: Учебное пособие. / В.А. Веренько – Минск.: УП «Технопринт», 2004. – 170 с.
9. Гамеляк І.П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу: дис. ... доктора техн. наук: 05.22.11 / Гамеляк Ігор Павлович – Київ, 2005. – 438 с.
10. Гезенцвей Л Б. Релаксация напряжений в асфальтобетоне Текст. / Л. Б. Гезенцвей, Э. А. Казарновская // Труды Союздорнии. – М.,1985. – С. 132-138.
11. Горельшев Н.В. Асфальтобетон

и другие битумо-минеральные материалы. / Н.В. Горельшев. – М.: Можайск. – Терра, 1995. – 176 с. 12. Казарновский В. Д. Метод количественной оценки температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий, устраиваемых на основаниях со швами и трещинами / В. А. Кретов, В. Д. Казарновский, А. Р. Краснопёров. // Труды ГП «РосдорНИИ». – М.: Росдорнии, 2000. – №10. – С. 153-163. 13. Мерзликин, А.Е. Об особенностях напряженно-деформированного состояния дорожных одежд с трещиновато-блочным основанием. / А.Е. Мерзликин // Конструирование, расчет и испытание дорожных одежд: сб. научн. тр. Союздорнии. – М., 1990. – С. 43-51. 14. Pais J.C. Evaluation of the Load Associated Cracking in Flexible Pavement. / Pais J.C. , Pereira P.A., J.M.B. Sausa, S. Capitaio // Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Correia & Branco (eds). – 2002. – P. 585-594. 15. Oscarsson Erik. Mechanistic-Empirical Modeling of Permanent Deformation in Asphalt Concrete Layers: Doctoral Thesis. – Traffic and Roads Department of Technology and Society Faculty of Engineering, LTH, Lund University, Sweden, 2011, – 53 p. 16. Lytton, R.L. Use of geotextiles for reinforcement and strain relief in asphalt concrete/ R.L. Lytton // Geotextiles and Geomembranes. – 1989. – Vol. 8. – № 3. – P. 217-237. 17. Glover Charles J. Evaluation of binder aging and its influence in aging of hot mix asphalt concrete: technical report FHWA/TX-14/0-6613 / Charles J. Glover, Guanlan Liu, Avery A. Rose, Yunwei Tong, Fan Gu, Meng Ling, Edith Arambula, Cindy Estakhri, and Robert Lytton – Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation, 2013. – 216 p. 18. Fyfe R. Paving fabric seal design and performance on Australian roads / R. Fyfe. // 2nd international and sealing conference-sustaining sprayed sealing practice, Melbourne, Australia, 2010, P. 1-31. 19. Coni M. F. Evaluation of 4-point bending test for fatigue cracking assessment / M. Coni, S.Portas, R. Isola, J.R.M. Oliveira. // Sixth RILEM International Conference on racking in Pavements, Chicago, Illinois, 9-11 June 2008 Chicago, USA, P. 1-10. 20. Al-Qadi I. L. Steel reinforcing netting mechanism to abate reflective cracking in asphalt concrete overlays. / I. L. Al-Qadi, M. A. Elseifi, and T. E. Freeman // Paper № 02-2615 presented at the Transportation Research Board 81st Annual Meeting. – Washington. : D.C., 2002. 21. Rigo J. M. General introduction, main conclusions of 1989 conference on reflective cracking in pavements, and future prospects. / J. M. Rigo // Reflective Cracking in Pavements : 2nd International RILEM Conference, E & FN Spon, Liege, Belgium, 1993, P. 3-20. 22. Зиновеев И. В. Способ определения напряженно-деформированного состояния многослойных оснований с дефектами / И. В. Зиновеев, А. К. Приварников. // Теоретическая и прикладная механика. – 2008. – Вып. 44. – С. 16–28. 23. Приварников А.К. Пространственная деформация многослойного основания [в кн.: Устойчивость и прочность элементов конструкций.] / А.К. Приварников – Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1973. – С. 27-45.