



УДК 625.7.032.32

© *Н. И. Горшков, М. А. Краснов, 2013*

## **НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ «АВТОДОРОГА-ГЕОСРЕДА» НА ОСНОВЕ МКЭ (ПЛОСКАЯ ЗАДАЧА)**

*Горшков Н. И.* – канд. техн. наук, доц. кафедры «Мосты, основания и фундаменты», e-mail: Fem\_Soft@mail.ru; *Краснов М. А.* – спец. кафедры «Мосты, основания и фундаменты» (ТОГУ)

Целью работы является математическое моделирование взаимодействия элементов системы «автодорога-геосреда», разработка новых способов оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) этой системы на основе МКЭ.

The purpose of the work is the mathematical modeling of the interaction of the “road - geomedium” system elements. Novel methods for the estimation of the strain-stress state of the system on the basis of the finite element method have been developed.

*Ключевые слова:* метод конечного элемента (МКЭ), покрытие, дорожная одежда, грунт, основание, прочность, деформируемость.

### **Введение**

Возможности современного программного продукта по проектированию транспортных сооружений, взаимодействующих с массивами грунтов, определяются принятыми в нем расчетными схемами и методиками расчета.

Авторский и иной опыт решения практических задач транспортного строительства показывает, что необходимое для этого современное нормативное геомеханическое обеспечение во многом не отвечает потребностям практики проектирования [1- 5 и др.].

В современной практике строительного проектирования инженерное сооружение и геологическая среда рассматриваются как единое целое, составные части которого взаимно влияют друг на друга [6]. Такой взгляд на систему проектирования требует постоянного совершенствования расчетных схем и методов анализа и оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов системы «сооружение – геосреда».

Разработка и совершенствование схем и методов, предшествующих выходу нормативных документов, не должны идти только по пути уточнения

отдельных их положений. Такой вариант совершенствования нормативного документа по проектированию нежестких дорожных одежд в виде уточнений и дополнений в методике был применен в более чем 30-ти летней практике его использования [7- 9]. И это делалось, несмотря на появление и развитие с 60-х годов прошлого века мощных средств решения прикладных технических задач – численных методов исследования НДС элементов систем «сооружение – геосреда» [2, 4, 5 и др.].

Осесимметричная расчетная схема конструкции дорожной одежды, принятая в названных документах, неадекватно отражает конструктивные особенности реальной системы «автодорога-геосреда» [2]. Часто, после проектирования и реализации на практике конструкции дорожной одежды, выполненной по методике этой инструкции [9], в материалах покрытия, на полосах наката образуются колеи, а между ними продольные трещины, см. рис. 1.

На рисунке показан характерный участок построенной в XXI веке автомобильной дороги «Лидога – Ванино» (Хабаровский край), конструкция дорожной одежды которой была запроектирована по правилам инструкции [9]. Расчетная схема и методика расчета дорожной одежды, заложенные в инструкции, не способны учесть и предотвратить образование таких реальных линейных дефектов материалов покрытия, как колеи и продольные трещины.



Рис. 1. Линейные отказы асфальтобетонного покрытия – колеи на полосах наката и продольная трещина

Из линейных особенностей реальной системы «автодорога – геосреда» следует, что в расчетах, анализе и оценках НДС материалов ее элементов, как минимум, необходимо использовать плоские расчетные схемы [1, 2, 10, 11].

На всех этапах расчета, должна быть единая расчетная схема системы «автодорога – геосреда», которая в едином расчете (определение НДС с учетом фильтрации, изменения температуры и др.) должна отражать реальное напряженное состояние и деформирование материалов её элементов.

### **Особенности анализа и оценки НДС системы на основе результатов решения прикладных задач МКЭ**

Для расчетов, анализа и оценки НДС элементов модели системы «сооружение-геосреда», на основе метода конечных элементов (МКЭ), разработана и трижды сертифицирована программа GenIDE32 [12].



В расчетах НДС используется нелинейная модель грунта на основе ассоциированного закона пластического течения с условием текучести по Кулону-Мору, как для дисперсных, так и для скальных (сплошных) грунтов.

Ниже приводятся некоторые результаты расчетов, выполненных по программе GenIDE32, для исходных данных конструкции поперечного сечения автомобильной дороги «Лидога-Ванино» на участке км 186 – км 193.

Геометрические размеры элементов конструкции автомобильной дороги: ширина двухполосной проезжей части  $2 \times 3,50 \text{ м} = 7,0 \text{ м}$ , ширина полос безопасности  $2 \times 0,50 \text{ м} = 1,5 \text{ м}$ , ширина обочин  $2 \times 2,0 \text{ м} = 4,0 \text{ м}$ , высота насыпи  $2,0 \text{ м}$ .

Параметры грунтов (материалов) элементов конструкции поперечного сечения тела автомобильной дороги приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование материала или грунта	$\gamma$ , МН/м <sup>3</sup>	$E$ , МПа	$\nu$	$\varphi (R_c)$ , град (МПа)	$c (R_t)$ , МПа (МПа)
№1 – а/б плотный, $h=0.04 \text{ м}$	0,024	3200	0,20	(8,64)	(1,08)
№2 – а/б пористый, $h=0.08 \text{ м}$	0,023	1800	0,20	(3,52)	(0,44)
№3 – щебеночно-песчаная смесь С6, $h=0,25 \text{ м}$	0,018	240	0,27	40	0,001
№4 – щебеночно-песчаная смесь С10, $h=0.30 \text{ м}$	0,018	310	0,27	45	0,00
№5 – щебенистый грунт (земляное полотно)	0,018	300	0,27	35	0,002
№6 – суглинок тугопластичный (основание насыпи)	0,018	70	0,35	12	0,04
№7 – щебенистый (материал обочин)	0,018	330	0,27	42	0,00

\*\*\*Параметры прочности асфальтобетона определены на основе известных эмпирических зависимостей:  $R_o \approx 2 R_b$ ,  $R_c \approx (4 \dots 5)R_o$ ,  $R_s \approx (8 \dots 10)R_i$ ; где  $R_o$  – расчетный предел прочности на растяжение при изгибе с учетом усталостных явлений материала (принимается по ОДН 218.046-01).

Расчет выполнялся для нормативной статической нагрузки на ось  $F=110 \text{ кН}$ , давлении  $p=0,60 \text{ МПа}$ , диаметре и площади круга, равновеликого площади отпечатка колеса расчетного автомобиля  $d=0,39 \text{ м}$ ,  $A=(\pi d^2)/4 \approx 0,12 \text{ м}^2$ . В условиях плоской деформации распределенная нагрузка от транспорта на полосах наката вычислялась для ширины одной полосы загрузки  $b=\sqrt{A} \approx 0,34 \text{ м}$  и её интенсивность равна  $p=0,60 \times 0,34 = 0,204 \text{ МН/м}$ .

В первой части исследования поверхностная нагрузка от транспорта прикладывалась на полосах наката на одной (схема 1) и двух полосах (схема 2) движения, в соответствии со следующим рекуррентным соотношением:

$$p_i = p_{i-1} + dp_i, \text{ где } p_{i-1} = 0,00, dp_i = 0,0204 \text{ МН/м и } i=11.$$

При таком варианте приложения нагрузки от транспортных средств можно проанализировать последовательное изменение траекторий НДС в разных сечениях и точках конструкции дорожной одежды и земляного полотна. Тра-

ектории изменения НДС рассматриваются в пространстве инвариантов тензора напряжений  $\sigma_{ij}$  и относительных деформаций  $\varepsilon_{ij}$ . В построении графиков траекторий используются следующие величины: среднее напряжение  $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ , средняя относительная деформация  $\varepsilon = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)/3$ , интенсивность нормальных напряжений  $\sigma_i = (1/\sqrt{2}) \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$ , интенсивность линейных деформаций  $\varepsilon_i = \sqrt{2}(1/3) \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$ . На графике, в квадранте величин « $\sigma_i - \varepsilon_i$ » показываются деформации формоизменения, « $\sigma_i - \sigma$ » траектории изменения напряженного состояния, « $\sigma - \varepsilon$ » объемные деформации, « $\varepsilon_i - \varepsilon$ » траектории изменения деформированного состояния. В настоящее время, такие графики являются основой, так называемого «паспорта прочности» испытываемого грунта.

В методике расчета дорожной одежды [9] критериальные оценки выполняются в точках по центральной оси под местом приложения нагрузки, при этом подразумевается, что асфальтобетонное покрытие в нижней части испытывает растяжение, а материалы основания и земляного полотна чистый сдвиг. В предыдущем документе [8] еще выполнялась проверка на сдвиг в слоях асфальтобетона, как будет показано дальше, в этом был некий смысл. В соответствии с такими представлениями выполняются опыты по определению параметров прочности асфальтобетонов – на изгибаемых балочках.

По результатам расчетов анализируется процесс изменения НДС в материалах конструкции автомобильной дороги в наиболее значимых сечениях: №1 – по оси левой полосы наката левой полосы движения, №2 – то же правой полосы наката левой полосы движения, №3 – по оси между полосами наката левой полосы движения, №4 – по центральной оси дороги.

Ниже, на рис. 2-5 представлены графики траекторий нагружения при приложении нагрузки от транспорта по схемам 1 и 2 в КЭ сечения №1.

График рис. 2 показывает, что плотный асфальтобетон испытывает простую траекторию нагружения – «раздавливание», при этом деформации формоизменения и объема имеют линейный вид. Такие же траектории испытывает КЭ нижней части пористого асфальтобетона. Верхняя часть пористого асфальтобетона при приложении нагрузки от транспорта как по схеме 1, так и по схеме 2, также нагружается по траектории «раздавливания», но более сложно, что сопровождается деформациями формоизменения – сдвигами (рис. 3, квадрант « $\sigma_i - \varepsilon_i$ »). Средняя часть этого слоя испытывает разные траектории в зависимости от схемы нагрузки. Например, по схеме 2 пористый асфальтобетон испытывает сначала гидростатическое нагружение по  $\sigma$ , а затем разгрузку по  $\sigma$  и нагружение по девиатору  $\sigma_i$ , при этом деформации формоизменения и объема также имеют линейный вид (рис. 4).

Все слои основания дорожной одежды находятся в предельном состоянии, а верхняя часть щебенисто-песчаного слоя С6 испытывает разрыхление (рис. 5, квадрант « $\sigma - \varepsilon$ »). Такой график характерен и для КЭ щебенисто-песчаного слоя С10 и материала верхней части земляного полотна, с начальным участком разрыхления.

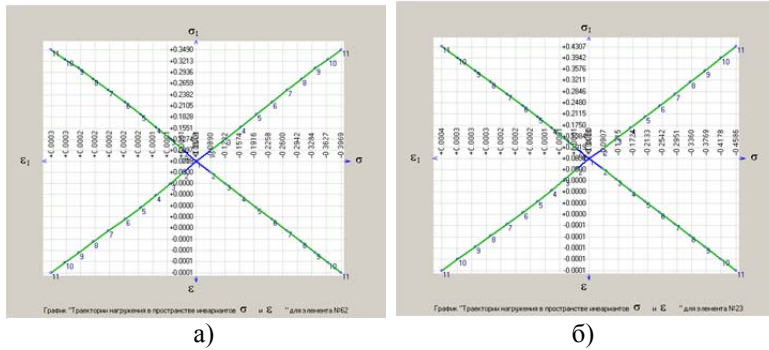


Рис. 2. Графики траекторий нагружения для КЭ верхнего слоя асфальтобетона в сечении №1: а) схема 1; б) схема 2

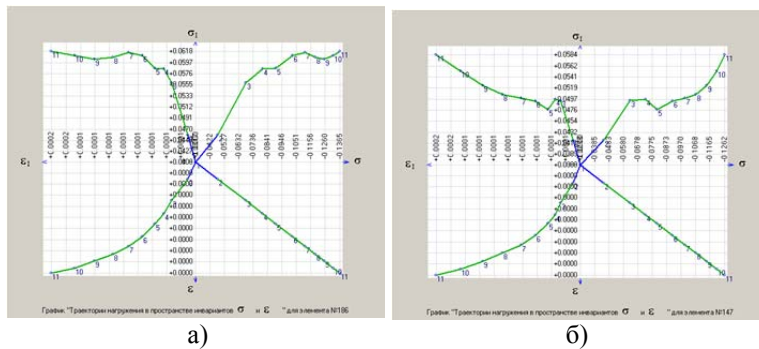


Рис. 3. Графики траекторий нагружения для верхнего КЭ нижнего слоя асфальтобетона в сечении №1: а) схема 1; б) схема 2

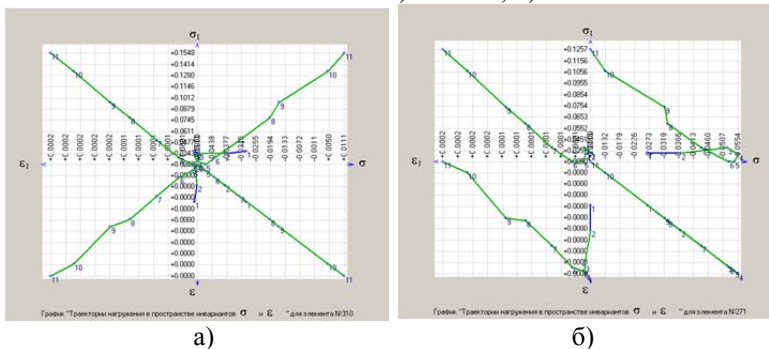


Рис. 4. Графики траекторий нагружения для среднего КЭ нижнего слоя асфальтобетона в сечении №1: а) схема 1; б) схема 2

Для сечения №3 плотный асфальтобетон сначала нагружается по траектории «раздавливания» и затем разгружается по тому же направлению. В сечении №4 (схема 2) плотный асфальтобетон сразу испытывает сложные траектории, сначала нагружение по  $\sigma_i$  и разгрузку по  $\sigma$ , затем разгрузку по  $\sigma_i$  и нагружение по  $\sigma$ , и снова нагружение по траектории «раздавливания».

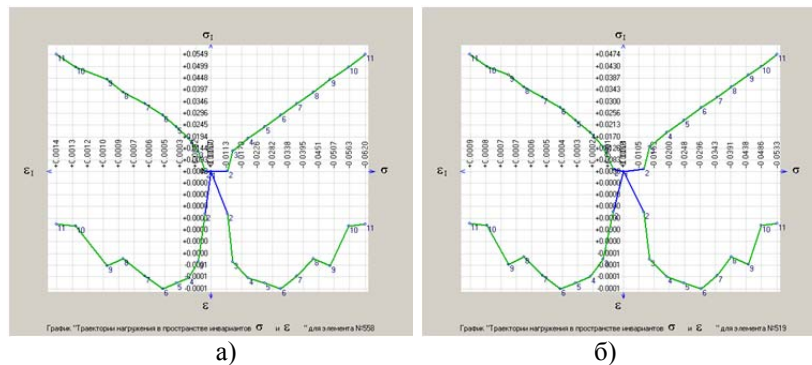


Рис. 5. Графики траекторий нагружения для верхнего КЭ слоя щебня С6 в сечении №1: а) схема 1; б) схема 2

В научно-технической литературе уже давно изучается проблема образования колеи на поверхности асфальтобетонных покрытий [13 и др.]. Основной причиной образования колеи на полосах наката считают накопление остаточных или пластических деформаций в материалах покрытия, основания дорожной одежды и земляного полотна из-за циклического приложения поверхностной нагрузки от транспорта.

Как известно, действующая нормативная методика проектирования дорожных одежд неспособна прогнозировать такой вид деформаций. Наиболее правильный на наш взгляд подход к количественному определению остаточных деформаций сделан исследователями РГСУ [4, 5, 14].

Ниже, на рис. 6-10, приводятся некоторые графические результаты второй части исследования, связанные с оценкой возможности образования колеи для рассматриваемого примера конструкции автомобильной дороги.

В этой серии расчетов, поверхностная нагрузка от транспорта прикладывалась по схеме 1 и 2 по следующему закону:  $p=(\pm 1)p$ , где  $p=0,204$  МН/м ( $10^2$  циклов нагрузки-разгрузки, время одного расчета около 7-ми часов).

Графики на рис. 6-9 показывают, что при циклическом приложении поверхностной нагрузки объемные деформации во всех слоях асфальтобетона являются линейными и упругими. В то же время, в верхней части пористого асфальтобетона наблюдается некоторое накопление деформаций формоизменения, большее при схеме 1. Графики траекторий нагружения в пространстве « $\sigma_i - \sigma$ » зависят от схемы приложения нагрузки. Так, плотный асфальтобетон по схеме 2 разгружается по девиатору тензора напряжений « $\sigma_i$ » (рис. 6 б). В слое пористого асфальтобетона наблюдается увеличение напряжений, см. квадрант « $\sigma_i - \sigma$ » на графиках.

Результаты расчетов при нагрузке по схеме 2 показывают, что в плотном асфальтобетоне в сечении №2 наблюдается траектория вида рис. 6 а.

На рис. 10 приведены графики для КЭ верха земляного полотна, на которых видно, что при циклическом приложении к поверхности дороги нагрузки от транспорта происходит накопление пластических деформаций, как объема,



так и формоизменения. Такие же графики характерны и для слоев основания дорожной одежды – щебенисто-песчаных смесей С6 и С10.

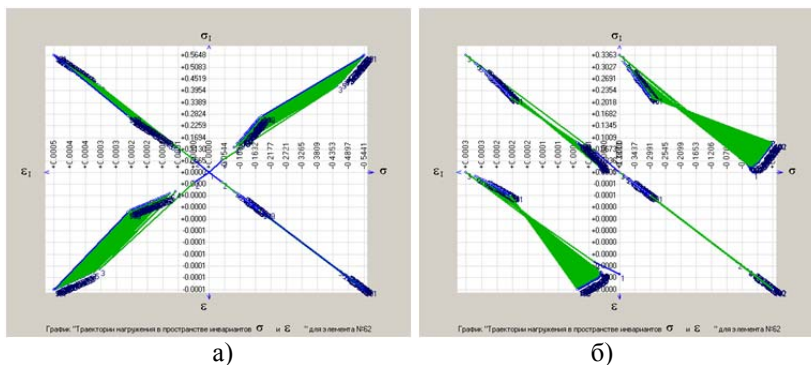


Рис. 6. Графики траекторий нагружения для КЭ плотного асфальтобетона в сечении №1: а) схема 1; б) схема 2

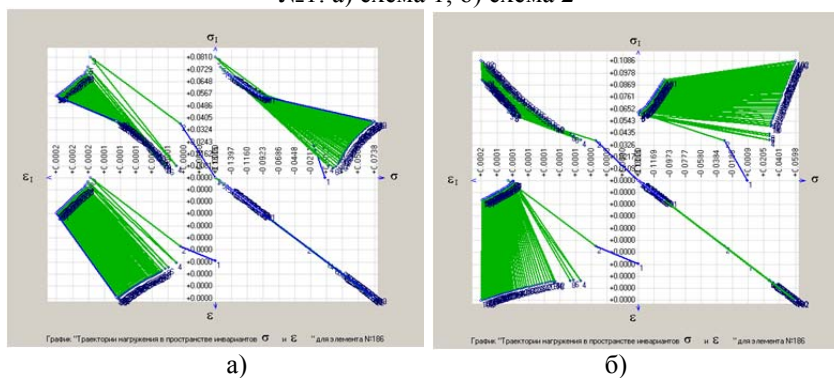


Рис. 7. Графики траекторий нагружения для верхнего КЭ пористого асфальтобетона в сечении №1: а) схема 1; б) схема 2

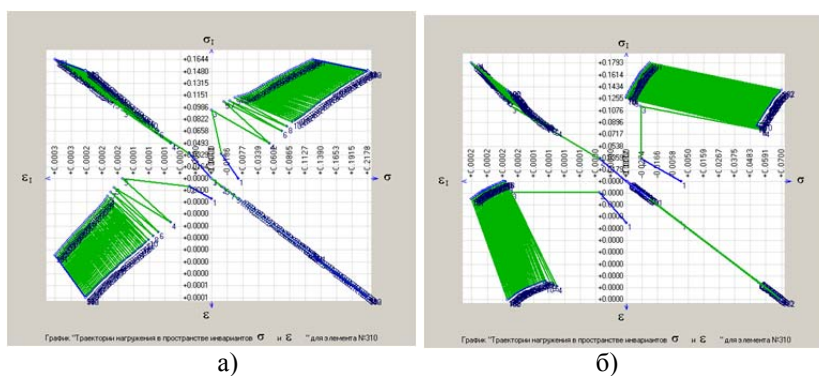


Рис. 8. Графики траекторий нагружения для среднего КЭ пористого асфальтобетона в сечении №1: а) схема 1; б) схема 2

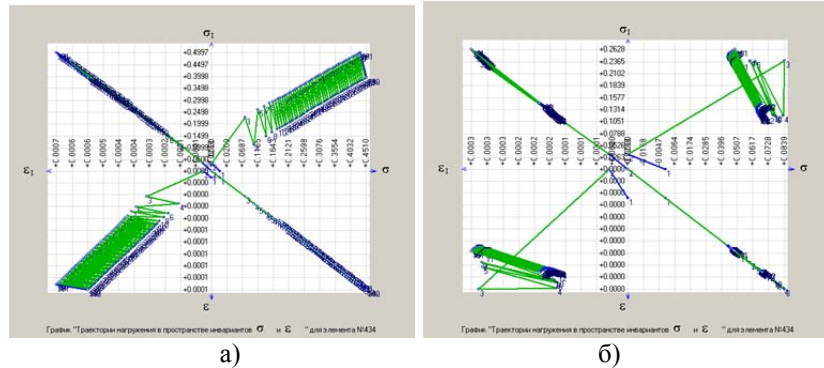


Рис. 9. Графики траекторий нагружения для нижнего КЭ пористого асфальтобетона в сечении №1: а) схема 1; б) схема 2

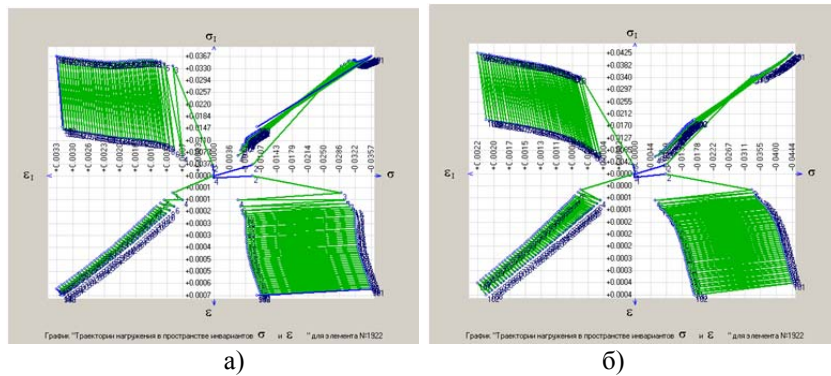


Рис. 10. Графики траекторий нагружения для КЭ верха земляного полотна в сечении №1: а) схема 1; б) схема 2

Для сечения №3 при схемах 1 и 2 в средней и нижней частях пористого асфальтобетона наблюдается небольшое накопление деформаций формоизменения.

Для сечения №4 при схемах 1 и 2 все траектории имеют вид рис. 6 а, при этом каждая траектории из-за наложения смотрится в виде одной линии (вид как на рис. 2).

Графики зависимости «вертикальное смещение – количество нагружений» для узла на поверхности покрытия в сечении №1 показывают рост смещений с увеличением циклов загрузки-разгрузки (рис. 11). Величины приращений смещений из-за пластических деформаций, в первую очередь материалов основания дорожной одежды и земляного полотна, за весь 100 кратный цикл загрузки-разгрузки для рассматриваемых схем нагружения равны соответственно:  $\approx 1.65$  мм и  $\approx 1.00$  мм.

Здесь нужно отметить, что смещения на полосах наката (колеи) происходят из-за положительных объемных деформаций (растяжения) и деформаций формоизменения – сдвигов, в первую очередь материалов основания дорож-





ной одежды и земляного полотна. Положительность объемных деформаций объясняется преобладанием поперечных движений материалов (движение к свободным поверхностям) над вертикальными.

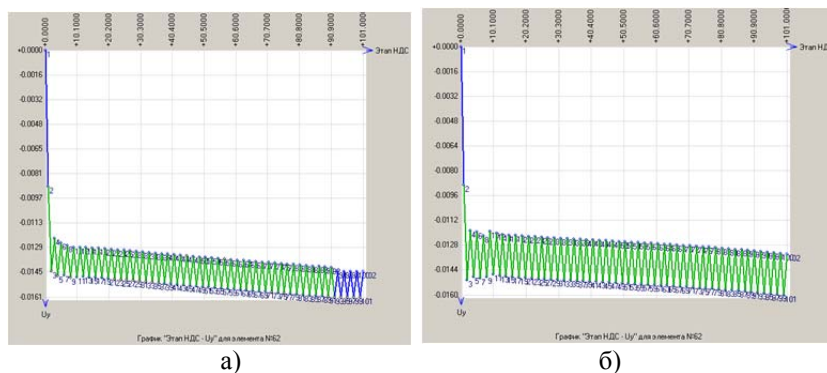


Рис. 11. Графики зависимости « $u_y$  – количество нагружений» поверхности покрытия в сечении №1: а) схема 1; б) схема 2

Еще нужно отметить, что при выводе на экран компьютера зон предельного состояния или «пластичности» (заштрихованные КЭ), в материале верхнего слоя основания дорожной одежды в сечениях №3 и №4 видны КЭ с вертикальной штриховкой – места возможного трещинообразования.

### Выводы и предложения

Основные выводы по результатам этого исследования, для принятых параметров и реологической модели материалов и грунтов:

- Материалы конструкции дорожной одежды в значимых сечениях испытывают разные траектории нагружения в пространстве инвариантов тензора напряжений и относительных деформаций, зависящих от схемы приложения нагрузки к поверхности покрытия дороги;
- При циклическом виде нагрузки от транспорта, пластические деформации асфальтобетонов (небольшое формоизменение), материалов основания дорожной одежды и земляного полотна (деформации объема и формоизменения) приводят к образованию на поверхности покрытия, в месте полос наката, колеи;
- Особенностью объемного пластического деформирования материалов основания и земляного полотна является их растяжение в поперечном направлении, которое превалирует над сжатием в вертикальном направлении.

В качестве предложения, реализация которого может прояснить процессы деформирования и потери прочности асфальтобетонов, можно указать на желательность проведения их стабилметрических испытаний по выявленным в расчетах траекториям изменения НДС, начало которым положено в исследовании [15].



### Библиографические ссылки

1. *Горшков Н.И.* Некоторые аспекты проектирования элементов поперечного сечения автомобильных дорог и применение численных методов расчета напряженно-деформированного состояния системы «автодорога – геосреда» // Известия вузов. Строительство. - 1997. - №5. – С. 92-97.
2. *Горшков Н.И.* Совершенствование геомеханического обеспечения дорог // Наука и техника в дорожной отрасли. - 2002. - №4. – С. 6-9.
3. *Смирнов А.В.* Прикладная механика дорожных и аэродромных конструкций: Учеб. Пособие. Омск: Изд. ОмГТУ, 1993. – 128 с.
4. *Илюполов С.К., Селезнев М.Г., Углова Е.В.* Динамика дорожных конструкций. – Ростов-н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2002. – 258 с.
5. *Матуа В.П., Панасюк Л.Н.* Прогнозирование и учет накопления остаточных деформаций в дорожных конструкциях. – Ростов-н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2001. – 372 с.
6. *СП22.13330.2011.* Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*. – М.: Министерство регионального развития РФ, 2011. – 166 с.
7. *Инструкция* по проектированию дорожных одежд нежесткого типа ВСН 46-72. Министерство транспортного строительства СССР. – М.: Транспорт, 1973. – 110 с.
8. *Инструкция* по проектированию дорожных одежд нежесткого типа ВСН 46-83. Министерство транспортного строительства СССР. – М.: Транспорт, 1985. – 157 с.
9. *Проектирование нежестких дорожных одежд* (ОДН 218.046-01)/Государственная служба дорожного хозяйства министерства транспорта Российской Федерации. – М.: 2001. – 143 с.
10. *Горшков Н.И., Краснов М.А.* Анализ и оценки НДС элементов системы «автодорога-геосреда» на основе МКЭ / Труды международной конференции по геотехнике «Развитие городов и геотехническое строительство». – Санкт-Петербург, 16-19 июня 2008, т. 3. – С. 151-158.
11. *Горшков Н.И.* Анализ и оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов покрытия аэродрома для обоснования его реконструкции / Горшков Н.И. // Вестник Тихоокеанского государственного университета. - 2007. - №1(4). – С. 45-56.
12. *Программа GenIDE32* для решения прикладных задач геомеханики / Горшков Н.И., Краснов М.А. Система сертификации ГОСТ Р Госстандарт России. Сертификат соответствия № РОСС RU.СП15.Н00431, 05.10.2011.
13. *Казарновский В.Д.* Проблема колееобразования на дорогах с асфальтобетонным покрытием // Наука и техника в дорожной отрасли. - 2000. - №2. – С. 3-4.
14. *Углова Е.В.* Моделирование деформирования нежестких дорожных конструкций при воздействии движущего транспорта // Известия вузов. Строительство. - 2009. - №3-4. – С. 31-35.
15. *Иванченко С.Н.* Научные основы формирования рабочих органов дорожных машин для уплотнения асфальтобетонных смесей: автореф. дис. д-ра техн. наук. СПб, 1997. – 34 с.