



УДК 629.139.001.12.006.2(038)

© *Н. И. Горшков, 2007*

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ (НДС) ЭЛЕМЕНТОВ ПОКРЫТИЯ АЭРОДРОМА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ЕГО РЕКОНСТРУКЦИИ

Н. И. Горшков – канд. техн. наук, доц. кафедры «Мосты, основания и фундаменты» (ТОГУ)

Анализ и оценка НДС элементов покрытия взлетно-посадочной полосы (ВПП-1) существующего аэродрома подтвердили наблюдающееся на практике разрушение материалов покрытия, что явилось обоснованием его реконструкции. Решение поставленной задачи было выполнено на основе метода конечных элементов с применением упругопластической модели для материалов и грунтов.

The reason for restructuring the present aerodrome runway has been testing of the runway pavement, its failure being veriflicated. The task set was carried out with the method of final elements, elastic models for materials and grounds having been used.

Российские нормативные документы, например [1], содержат прямые указания на выполнение совместного расчета реальной системы «сооружение-основание». Однако в инженерной практике эти требования чаще всего остаются декларативными. Например, методика и расчетные схемы, принятые в инструкции [2], на основе которой разработана методика расчета конструкций асфальтобетонных покрытий аэродромов [3], практически не менялись в своей основе в течение более 30 лет. Поэтому можно с уверенностью отметить, что действующая методика уже давно не отвечает современным требованиям расчета таких конструкций [4, 5, 6].

По своим техническим параметрам рассматриваемый аэродром соответствует классу «В» – эксплуатируется самолетами Ту-154, Ту-134, ИЛ-76Т и др.

Существующая конструкция покрытия представлена следующими элементами:

– асфальтобетон 0,40 м (марка I тип Б);



- щебень 0,40 м;
- песчано-гравийная смесь (ПГС) 0,20 м.

Основание представлено суглинками пылеватыми от полутвердой до тугопластичной консистенции.

Поперечный уклон двухскатного покрытия $I = 0,01$.

Геомеханическая модель системы создавалась на основе разработанной методики оценки НДС элементов системы «сооружение – геосреда», основные принципы которой изложены в статьях [4, 5, 6]. В качестве средства расчета НДС элементов системы принят метод конечного элемента (МКЭ), на основе которого разработаны алгоритмы программного комплекса Genide32 (авторы Н. И. Горшков, М. А. Краснов).

Расчетная схема системы «колесо-покрытие-основание» строилась для решения целей и задач, поставленных заказчиком в техническом задании.

Значения деформационных и прочностных параметров (по первому предельному состоянию) природных грунтов, материалов элементов системы приняты на основе данных заказчика (табл. 1).

Таблица 1

Расчетные значения параметров грунтов и материалов покрытия для ВПП-1

№ИГЭ, наименование грунта или материала	γ_1 , кН/м ³	E, МПа	ν	$\varphi_1 (R_c)$, град, (МПа)	$c_1 (R_t)$, кПа, (МПа)
№ 6 – асфальтобетон существ. 0,06 м	23,0	1200,0	0,30	6,8	0,85
№ 4 – щебень (основание) 0,40 м	18,0	300,0	0,27	37,0	0,00
№ 2 – ПГС (основание) 0,20 м	20,0	180,0	0,27	32,0	0,00
№ 1 – суглинок тугопл. (осн. природное)	18,0	15,0	0,35	12,0	15,0

В расчетах НДС была принята нелинейная модель грунтов и материалов на основе ассоциированного закона пластического течения с условием текучести по Кулону-Мору [7]. В этой модели, часто называемой моделью Друкера-Прагера, широко применяемой в расчетах грунтовых оснований и массивов грунтов с середины 70-х годов XX в., используются всего четыре стандартных параметра для дисперсных грунтов: E – модуль упругости (деформации), ν – коэффициент Пуассона



сона, φ – угол внутреннего трения (для сплошных материалов и скальных грунтов R_c – предел прочности на одноосное сжатие), c – удельное сцепление (для сплошных материалов и скальных грунтов R_t – предел прочности на одноосное растяжение). Они определяются при испытаниях дисперсных и скальных грунтов в стандартных геотехнических приборах.

Процесс моделирования предполагает следующую схему выполнения расчетов:

- начального напряженного состояния системы;
- НДС при приложении нагрузки в месте колес опоры воздушного судна (ВС) по рекуррентной зависимости: $p_i = p_{i-1} + dp_i$, где $p_{i-1} = 0$ и $i = 1 \dots n$ (число шагов нагружения), МН/м.

На каждом этапе моделирования выполнялся анализ и оценка прочности, несущей способности и деформируемости каждого элемента модели и всей системы в целом.

Все расчетные значения нагрузок приняты с коэффициентами безопасности и сочетания по нагрузкам, рекомендуемые нормативными документами.

Критериальные оценки для конструкции и ее элементов выполнялись на основе условий действующих нормативных документов [6].

Анализ и оценка НДС элементов системы выполнялась на основе всех имеющихся средств интерфейса компьютера: изолиний, уровней и эпюр значений вычисляемых величин, а также результатов мониторинга вычисляемых величин в значимых КЭ и узлах сетки разбивки.

Оценка прочности дисперсного грунта и материалов в узлах или конечных элементах (КЭ) расчетной области выполнялась по значению коэффициента запаса прочности имеющего вид

$$k_{str} = \tau_u / \tau = 2\tau_{max} \cos \varphi / [c + \operatorname{tg} \varphi (\sigma_1 + \sigma_3 - 2\tau_{max} \sin \varphi)], \quad (1)$$

где τ_{max} – максимальное касательное напряжение, c – удельное сцепление, φ – угол внутреннего трения.

При значении $k_{str} \approx 1,0$ дисперсный материал находится в предельном состоянии при сдвиге, при $k_{str} \approx 0,0$ при растяжении. Зоны с такими значениями k_{str} совпадают с зонами «пластичности» или предельного состояния. В графических результатах расчетов конечные элементы, попадающие в зоны «пластичности», заштриховываются.

Для скальных грунтов и сплошных материалов (асфальтобетонов) оценка прочности выполнялась по значению коэффициента запаса прочности, выведенного из условия прочности Кулона-Мора для пря-



молинейной огибающей поверхности текучести (след поверхности в плоской системе координат)

$$k_{str} = (2/(\sigma_1 - \sigma_3))\sqrt{(-\sigma_1 \operatorname{tg} \varphi + c)(-\sigma_3 \operatorname{tg} \varphi + c)}, \quad (2)$$

где $\operatorname{tg} \varphi = (1-n)/(2\sqrt{n})$, $c = 0,5R_c\sqrt{n}$, $n=R_t/R_c$, R_c и R_t – пределы прочности на одноосное сжатие и растяжение соответственно.

Так как в нормативном документе [3] приводятся только значения предела прочности на растяжение при изгибе R_{tsh} , то необходимые для оценки по условию (2) параметры прочности определялись по эмпирическим зависимостям, полученным на основе опытов для асфальтобетонных [8]: $R_t \approx 0,5R_{tsh}$, $R_c \approx (8... 10)R_t$.

По значениям параметра вида напряженного состояния (Надаи-Лоде) $\sigma_v = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ можно выявить неоднородности НДС в элементах системы: +1 – одноосное растяжение, 0 – чистый сдвиг, -1 – одноосное сжатие.

В зонах растяжения для дисперсных грунтов и материалов, при $k_{str} \approx 0,0$ и $\sigma_v \approx +1$ возможно возникновение трещин растяжения; в зонах сдвига, при $k_{str} \approx 1,0$ и $\sigma_v \approx +0$ трещин сдвига.

Кроме того, оценку прочности можно также выполнять по известному условию

$$\sigma_{ij} \leq [\sigma_{ij}], \quad (3)$$

где σ_{ij} и $[\sigma_{ij}]$ – расчетные и предельные (допускаемые) значения компонент тензора напряжений, включая, например, допускаемое напряжение сжатия в материалах конструкций $[\sigma_0]$ или пределы прочности сплошных материалов на одноосное растяжение R_t или сжатия R_c , и т. п.

Условие (3) в модернизированной записи документа [3] будет иметь вид

$$\sigma_{ij} \leq \gamma_c R_b, \quad (4)$$

где γ_c – коэффициент условий работы для асфальтобетона, принимаемый для групп участков аэродромных покрытий: Б и В – 1,1.

Оценка несущей способности грунтов основания выполняется по различным графикам, связывающим напряжения, относительные деформации и смещения. Например, для узла, расположенного на центральной оси места приложения нагрузки, по нелинейному графику зависимости между вертикальными напряжениями и вертикальными



смещениями ($\sigma_{yy} - u_y$) можно оценить несущую способность грунта основания так же, как это делается в экспериментах при нагружении штампов или фундаментов, расположенных на грунтовых основаниях.

Стандартное условие оценки несущей способности имеет вид (без учета коэффициентов безопасности)

$$F < F_u, \quad (5)$$

где F и F_u – расчетная несущая способность грунта основания и предельное значение силы сопротивления грунта основания.

Оценку деформируемости системы можно выполнить по графикам $\sigma_{ij} - u_i$ (напряжения-смещения) для узлов, в которых производится мониторинг вычисленных величин. По таким графикам можно проследить влияние различных технологических, конструктивных и силовых факторов на величины смещений элементов сооружения и в конечном итоге выполнить стандартную оценку нормативного условия расчета оснований сооружений по деформациям

$$S \leq S_u, \quad (6)$$

где S – расчетное значение величины упругой деформации (вертикальной осадки); S_u – предельное значение величины упругой деформации (вертикальной осадки).

Это же условие в форме, принятой в документе [3], имеет вид

$$\lambda_d \leq \gamma_c \lambda_{d, \text{пред}}, \quad (7)$$

где λ_d – расчетный относительный прогиб покрытия от нагрузки, γ_c – коэффициент условий работы для асфальтобетона, принимаемый для групп участков аэродромных покрытий: Б и В – 1,05, $\lambda_{d, \text{пред}}$ – предельный относительный прогиб покрытия, определяемый по условиям документа [3].

Как известно, расчеты аэродромных покрытий [3], а также дорожных одежд автомобильных дорог [2] выполняются на основе решения осесимметричной задачи теории упругости. В расчетной схеме двух-трехслойного полупространства нагрузка от ВС и автомобилей прикладывается по площади круга, равновеликой площади следов колес транспортных средств, расположенных на поверхности. В отличие от автомобилей, где нагрузка прикладывается по следу одного колеса или двух спаренных, для ВС равновеликая площадь определяется для всех колес главной опоры.

Здесь приводятся результаты решения плоской задачи, в которой нагрузка прикладывается в виде полос интенсивностью $p = bp_a$, где b – ширина полосы загрузки под парой колес опоры, p_a – давление в пневматике колеса ВС. Ширина полосы загрузки определяется из площади равновеликого круга, вычисленной для одного загруженного расчетной нагрузкой пневматика в следующей последовательности: диаметр равновеликого круга $D = \sqrt{4F/\pi p_a}$, площадь $A = \pi D^2/4$, ширина полосы $b = \sqrt{A}$. По формулам нормативного документа [3], для ВС Ту-154 ($F_d = (k_d \gamma_c F_n)/n_k = (0,85 \times 1,1 \times 707)/4 = 165,26$ кН, $p_a = 0,932$ МПа), необходимые для расчета величины равны: $a = 0,20$ м, $b = 0,40$ м, $p = 0,40$ МН/м.

Сетка разбивки модели системы состояла из 6501 узла и 6470 конечных элементов (учитывалась симметрия конструкции относительно центральной оси ВПП-1).

Геомеханическая модель системы «колесо – покрытие – основание» представлена на рис. 1 (в выделенных «глазом» узлах и конечных элементах, в процессе расчета выполняется мониторинг вычисленных величин).

Согласно принятой схеме расчетов, сначала были выполнены расчеты по определению начального напряженного состояния природных и техногенных элементов системы от действия объемных сил.

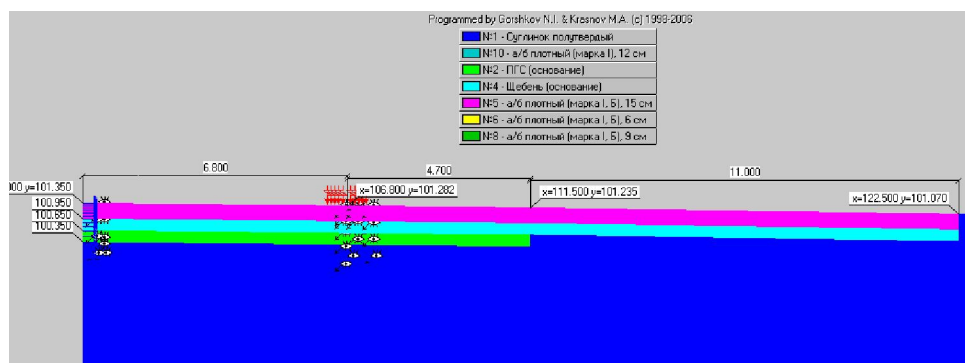


Рис. 1. Геомеханическая модель системы «колесо-покрытие-основание» для ВПП-1

Затем по полосам была приложена распределенная нагрузка от ВС. Нагрузка прикладывалась ступенями, в соответствии с рекуррентной зависимостью $p_i = p_{i-1} + dp_i$, где $p_{i-1} = 0,0$ МН/м и $dp_i = 0,04$ МН/м (10 этапов нагружения за один проход ВС).

Результаты расчетов от такого нагружения покрытия представлены на рис. 2 – 9.



На рис. 2 показаны уровни значений параметра вида напряженного состояния σ_v и образовавшиеся в материалах элементов конструкции покрытия зоны «пластичности»: в нижнем слое асфальтобетона под местом приложения нагрузки, практически во всем слое основания (щебне и ПГС). Зоны «пластичности» первоначально возникали в слое щебня, в местах, расположенных ближе к оси ВПП-1, затем они охватили почти все слои основания и на последних этапах нагружения появились в нижнем слое асфальтобетона под местом приложения нагрузки. Зоны, близкие к растяжению, возникают и развиваются в суглинке природного основания.

На рис. 3 показаны уровни значений параметра вида напряженного состояния σ_v в сплошных материалах покрытия (асфальтобетонах). Нижний слой асфальтобетона в окрестности места приложения нагрузки испытывает состояние близкое, к сдвигу.

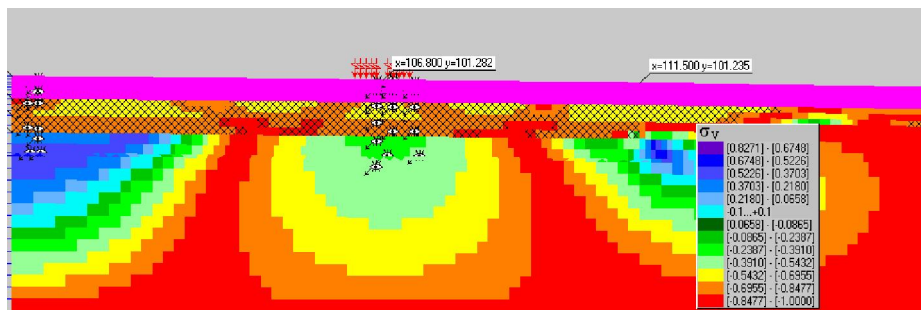


Рис. 2. Уровни значений параметра вида напряженного состояния σ_v ($=1$ – растяжение, $=0$ – чистый сдвиг, $=-1$ – сжатие) и зоны «пластичности» (заштрихованные КЭ)

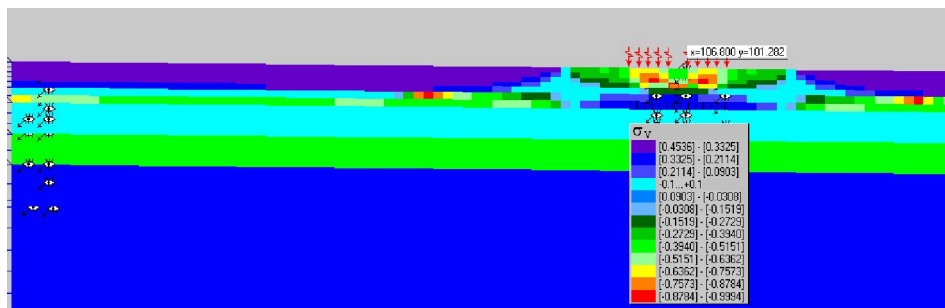


Рис. 3. Уровни значений параметра вида напряженного состояния σ_v для слоев асфальтобетона

Под местом приложения нагрузки в этом слое возможно образование трещин, вертикальная штриховка зон «пластичности» указывает на эту возможность. Напряженное состояние асфальтобетона весьма не-

однородное; место приложения нагрузки обрамляют зоны чистого сдвига, точечные зоны сжатия находятся только непосредственно под местом приложения нагрузки и в некотором удалении от него.

Рассматривая векторное поле системы, можно увидеть наличие двух вихрей в этом поле, в том числе в слоях асфальтобетона (рис. 4). Элементы системы в таких местах испытывают сложное циклическое нагружение при движении ВС, где возможно возникновение продольных трещин. По центральной оси системы при приложении поверхностной нагрузки происходит подъем поверхности покрытия (рис. 5). В этом месте необходимо устраивать продольный деформационный шов из упругих пористых материалов.

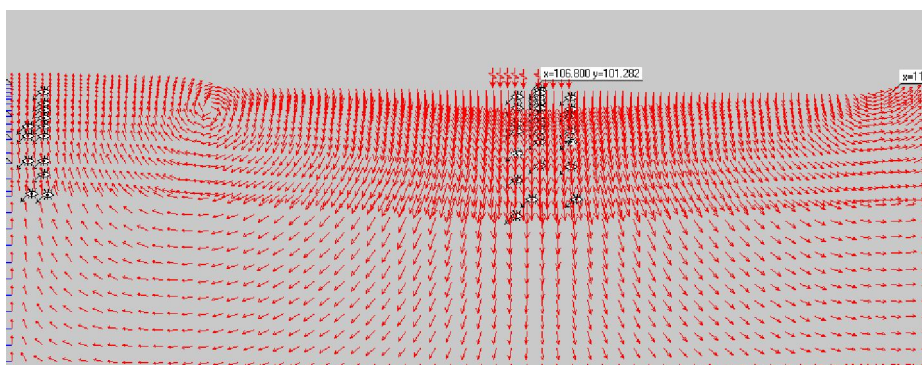


Рис. 4. Фрагмент векторного поля смещений (от начального НДС)

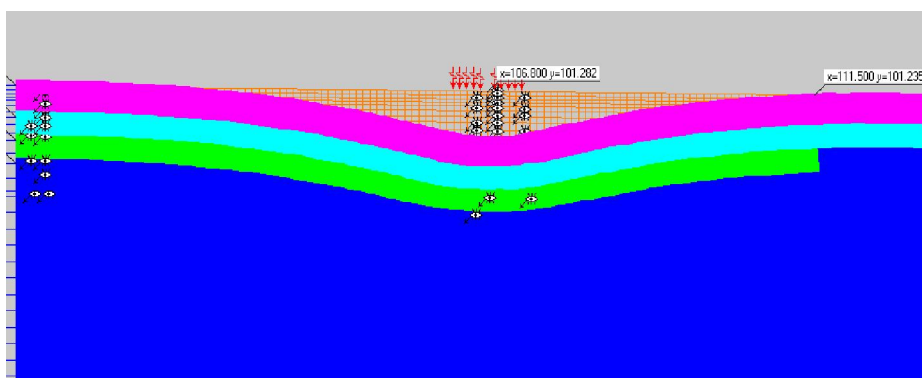
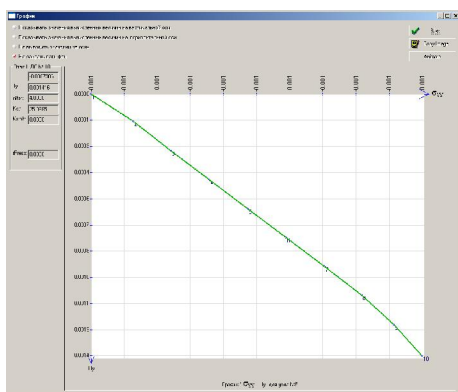


Рис. 5. Фрагмент деформированной сетки разбивки.
М 1:50 (от начального НДС)

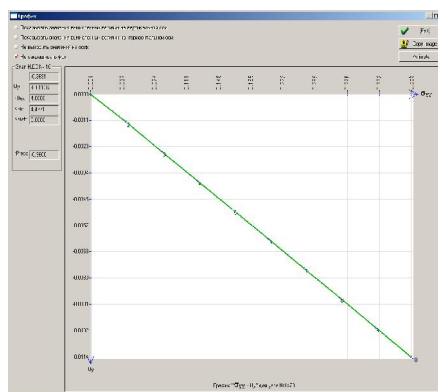
Зависимости между вертикальным нормальным напряжением σ_{yy} и вертикальной компонентой вектора смещений u_y показаны на рис. 6. Максимальные вертикальные смещения $u_y = -6.56$ мм наблюдаются



под местом приложения нагрузки. На поверхности покрытия по центральной оси ВПП-1 вертикальные смещения равны $u_y = +0.50$ мм, а на графике, на последних этапах нагружения, наблюдается некоторая нелинейность зависимости $\sigma_{yy} - u_y$. Относительная разность вертикальных смещений между этими местами равна $(-0,01136 - 0,00142)/6,8 = 0,00188$ (рис. 6); в пределах ширины приложенной нагрузки с учетом расстояния между колесами относительный прогиб равен $u/B = 0,01161/(0,4+0,2+0,4) = 0,01161$. Предельный относительный прогиб, вычисленный для принятого ВС по формуле документа [3], равен $0,004935$. Проводить сравнение результатов решения плоской и пространственной (осесимметричной) задач в этом случае некорректно, но значение относительного прогиба достаточно велико.



а



б

Рис. 6. График зависимости « $\sigma_{yy}-u_y$ », МПа-м: а) для узла на центральной оси ($u_y = +0,00142$ м); б) то же на оси следа правого пневматика ($u_y = -0,01136$ м)

Напряженное состояние элементов системы можно оценить по уровням значений главных компонент тензора напряжений (рис. 7 и 8). По значениям компоненты σ_1 все материалы испытывают сжатие (максимальное значение $\sigma_1 = -1,508$ МПа, минимальное $\sigma_1 = -0,126$ МПа; то же для $\sigma_3 = -0,37$ МПа и $\sigma_3 = +0,71$ МПа). На 7-м этапе нагружения в нижнем слое асфальтобетона образовались трещины (вертикальная штриховка КЭ) (рис. 7 и 8). На последнем этапе нагружения нижний слой асфальтобетона под местом приложения нагрузки испытывает растяжение по $\sigma_3 = +0,76$ МПа ($R_t = 0,85$ МПа). Верхние слои асфальтобетона в окрестности этого места также испытывают растяжение по $\sigma_3 = +0,34$ МПа. По мере выветривания и старения верхнего слоя асфальтобетона в таких местах возможно образование продольных тре-

щин растяжения, что собственно и выявилось при обследовании покрытия ВПП-1 аэродрома.

НДС нижнего слоя асфальтобетона под местом приложения нагрузки можно оценить по графикам траекторий нагружения в пространстве инвариантов тензора напряжений и относительных деформаций (рис. 9).

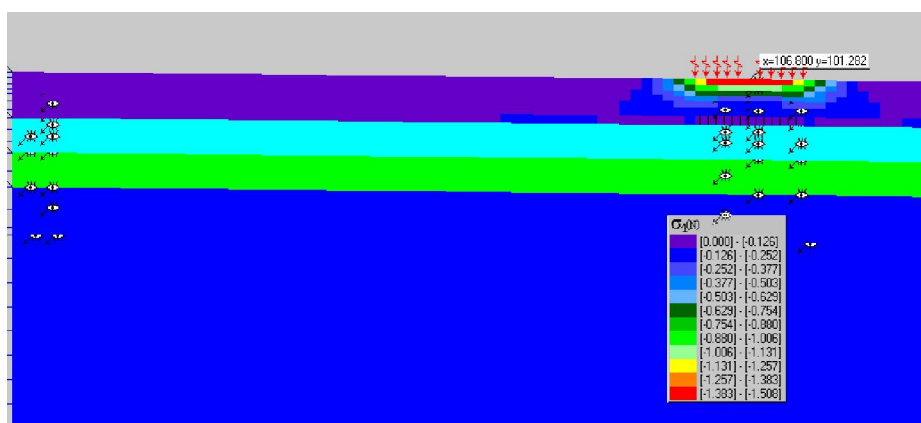


Рис. 7. Уровни значений главных напряжений σ_1 , МПа

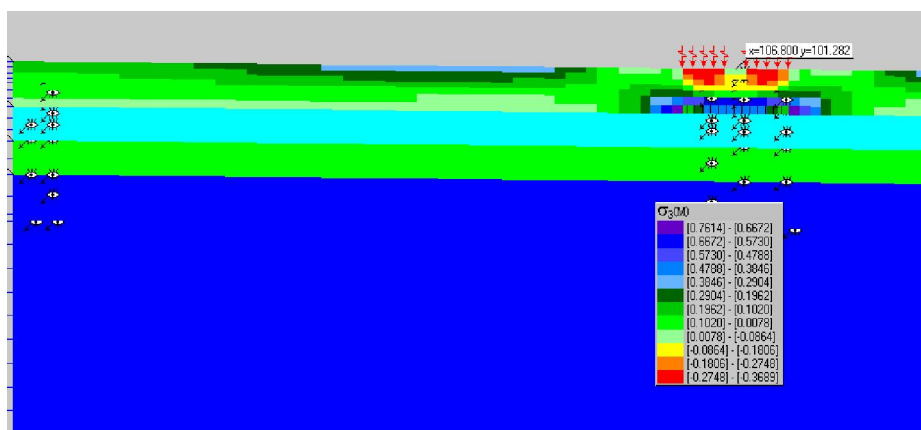


Рис. 8. Уровни значений главных напряжений σ_3 , МПа

Другие пользовательские графики точно подтверждают, что на седьмом этапе приложения нагрузки произошло образование трещин в нижнем слое асфальтобетона. На это указывает резкое уменьшение значений интенсивности напряжений σ_i (квадрант графика деформаций формоизменения σ_i - ϵ_i) и среднего напряжения σ (квадрант графика объемных деформаций σ - ϵ), (см. рис. 9, а). Материал асфальтобетона в



этом месте испытывает разгрузку, его последующее нагружение приводит к увеличению значений σ_i и σ .

В то же время, в отличие от нижнего слоя, нагружение материала верхнего слоя асфальтобетона под местом приложения нагрузки близко к монотонному, (см. рис. 9, б).

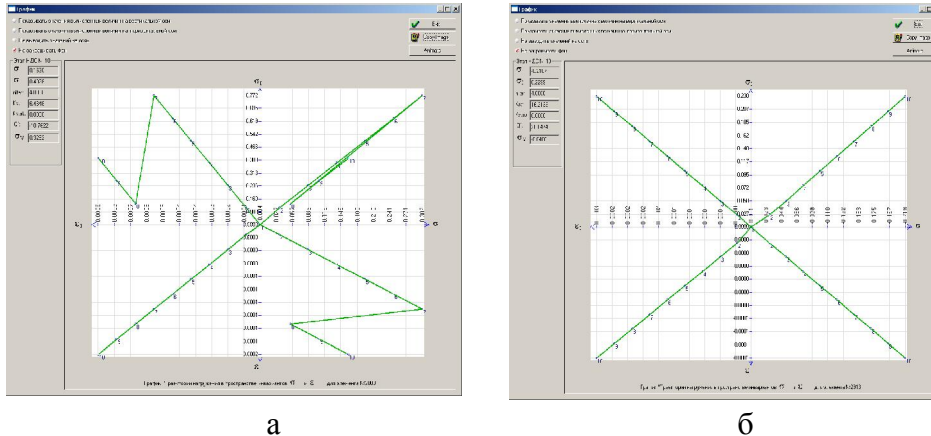


Рис. 9. Траектории нагружения в пространстве инвариантов тензора напряжений и относительных деформаций: деформации формоизменения σ_i - ϵ_i , траектории нагружения в пространстве σ_i - σ , деформации объема σ - ϵ , траектории нагружения в пространстве ϵ_i - ϵ : а – для КЭ нижнего слоя асфальтобетона под местом приложения нагрузки; б – для КЭ верхнего слоя асфальтобетона под местом приложения нагрузки

В целом анализ и оценка НДС элементов конструкции покрытия аэродрома показали, что материал асфальтобетона не удовлетворяет критериям прочности и деформируемости.

Библиографические ссылки

1. ГОСТ 27751-88. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. М., 1989.
2. Проектирование нежестких дорожных одежд (ОДН 218.046-01)/Государственная служба дорожного хозяйства министерства транспорта Российской Федерации. М., 2001.
3. СНиП 2.05.06-85*. Аэродромы/Госстрой СССР. М., 1985.
4. 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.
5. Горшков Н. И. Совершенствование геомеханического обеспечения дорог // Наука и техника в дорожной отрасли. 2002. № 4.



6. *Горшков Н. И., Краснов М. А.* Особенности применения, опыт разработки и внедрения программного комплекса на основе метода конечных элементов для решения прикладных задач геомеханики в транспортном строительстве // *Фундаментальные и прикладные вопросы механики.* Хабаровск, 2003.

7. *Фадеев А. Б.* Метод конечных элементов в геомеханике. М., 1987.

8. *Рыбьев И. А.* Асфальтовые бетоны: Учеб. пособие для строительных вузов. М., 1969.