

УДК 629.139.001.12.006.2(038)

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ (НДС)
СИСТЕМЫ «АЭРОДРОМ-ГЕОСРЕДА» ПРИ
«КВАЗИВРЕМЕННОМ» НАГРУЖЕНИИ ПОВЕРХНОСТИ
АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ**

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

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-ти 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 конструктивными элементами:

- Асфальтобетон 0,40 м (марка I тип Б);
- Щебень 0,30 м;
- Песчано-гравийная смесь (ПГС) 0,30 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 [7].

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 существующей системы приняты на основе данных заказчика, см. табл. 1.

Табл.1

Расчетные значения параметров грунтов и материалов покрытия для ВПП-1

№ИГЭ, наименование грунта или материала	γ_i , кН/м ³	E, МПа	ν	$\varphi_i (R_c)$, град (МПа)	$c_i (R_t)$, кПа (МПа)
№6 – Асфальтобетон существ. 0,40 м	23,0	1200,0	0,30	6,8	0,85
№4 – Щебень (основание) 0,30 м	18,0	300,0	0,27	37,0	0,00
№2 – ПГС (основание) 0,30 м	20,0	180	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 [8]. В этой модели, часто называемой моделью Друкера-Прагера, широко применяемой в расчетах грунтовых оснований и массивов грунтов с середины 70-х годов XX века, используются всего четыре стандартных параметра для дисперсных грунтов: E – модуль упругости (деформации), ν – коэффициент Пуассона, 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:

1. Расчет начального напряженного состояния системы;
2. Расчет 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 рекомендуемыми нормативными документами.

Критериальные оценки для конструкции и ее элементов выполнялись на основе условий действующих нормативных документов [3].

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 (Тер-Мартirosян З.Г., Ахпателов Д.М., 1969), имеющего вид

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

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 (А. Б. Фадеев, 1986). 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 (Мгалобелов Ю.Б., 1979), выведенного из условия прочности Кулона-Мора для прямолинейной огибающей поверхности текучести (след поверхности в плоской системе координат)

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

Где $tg \varphi = (1 - n) / (2\sqrt{n})$, $c = 0.5 R_c \sqrt{n}$, $n = R_t / R_c$, 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 асфальтобетонов [9]: $R_t \approx 0.5R_{tsh}$, $R_c \approx (8... 10)R_t$.

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 этого, 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, также, 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

$$\lambda_d \leq \gamma_c \lambda_{db} \quad (7)$$

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, λ_{db} – 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, равновеликого 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 $p = b p_a$, 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.

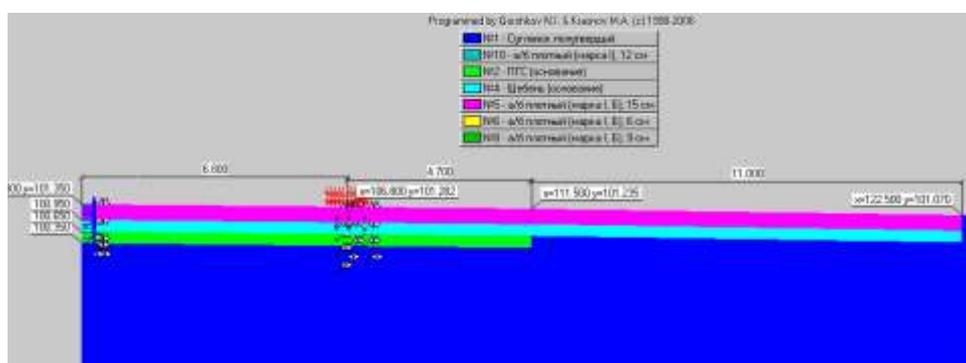


Рис. 1. Геомеханическая модель системы «колесо-покрытие-основание» для ВПП-1

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 «квазивременного» 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 (синяя окраска).

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.

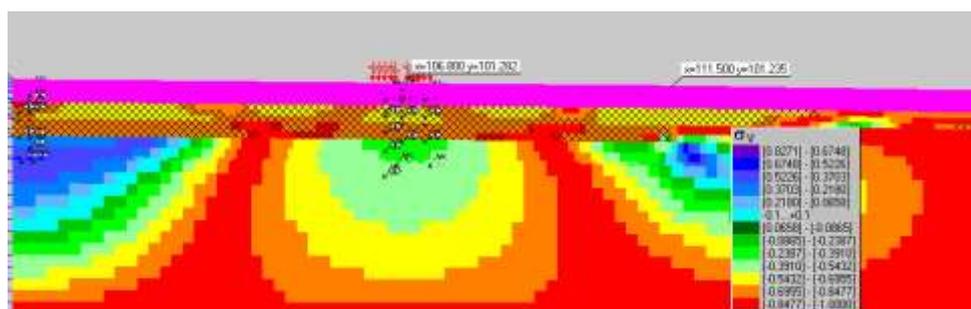


Рис. 2. Уровни значений параметра вида напряженного состояния σ_v (=1 – растяжение, =0 – чистый сдвиг, =-1 – сжатие) и зоны «пластичности» (заштрихованные КЭ)

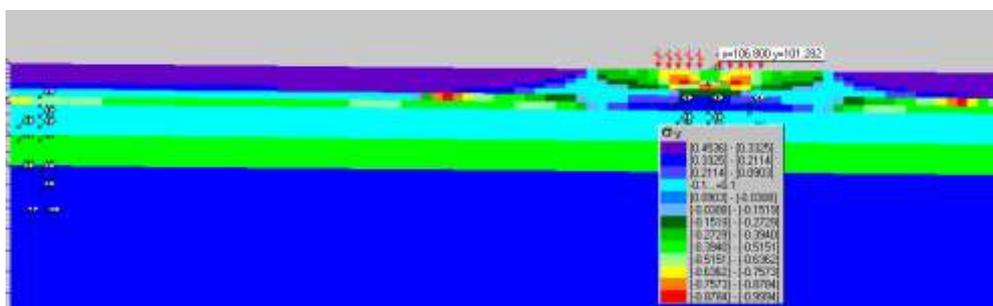


Рис. 3. Уровни значений параметра вида напряженного состояния σ_v для слоев асфальтобетона

Под местом приложения нагрузки в этом слое возможно образование трещин, вертикальная штриховка зон «пластичности» указывает на эту возможность. Напряженное состояние асфальтобетона весьма неоднородное; место приложения нагрузки обрамляют зоны чистого сдвига (голубая окраска), точечные зоны сжатия находятся только непосредственно под местом приложения нагрузки и в некотором удалении от него (красная окраска).

Рассматривая векторное поле системы, можно увидеть наличие двух вихрей в этом поле, в том числе в слоях асфальтобетона, см. 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, см. рис. 5. В этом месте необходимо устраивать продольный деформационный шов из упругих пористых материалов.

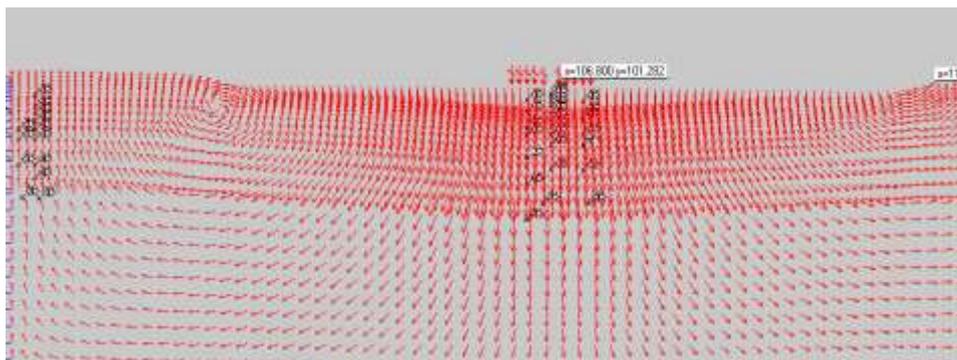


Рис. 4. Фрагмент векторного поля смещений (от начального НДС)

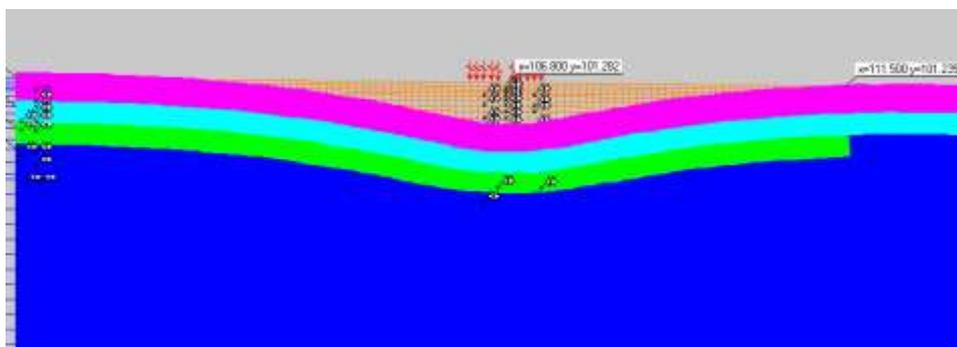


Рис. 5. Фрагмент деформированной сетки разбивки М 50:1 (от начального НДС)

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 $(-0.01136 - 0.00142) / 6.8 = 0.00188$ (см. 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.

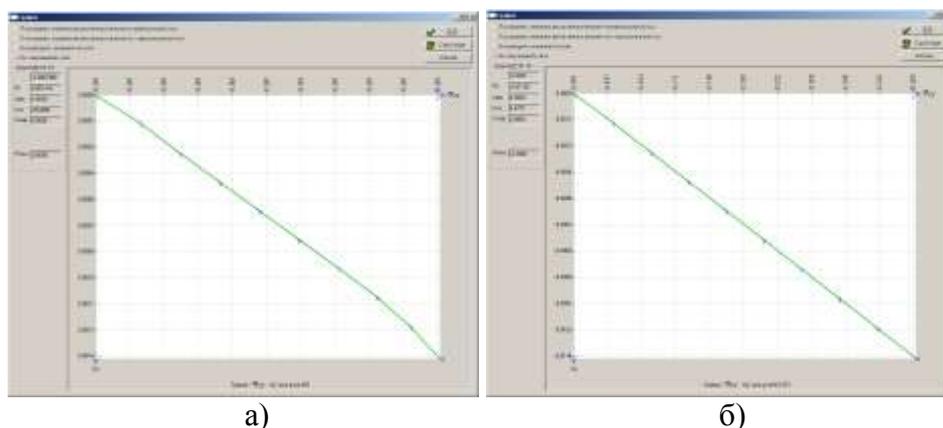


Рис. 6. График зависимости « $\sigma_{yy}-u_y$ », МПа-м: а) для узла на центральной оси ($u_y=+0.00142$ м); б) то же на оси следа правого пневматика ($u_y=-0.01136$ м)

Напряженное состояние элементов системы можно оценить по уровням значений главных компонент тензора напряжений, см. 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-ом этапе нагружения в нижнем слое асфальтобетона образовались трещины (вертикальная штриховка КЭ), см. 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 трещин 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, см. рис. 9.

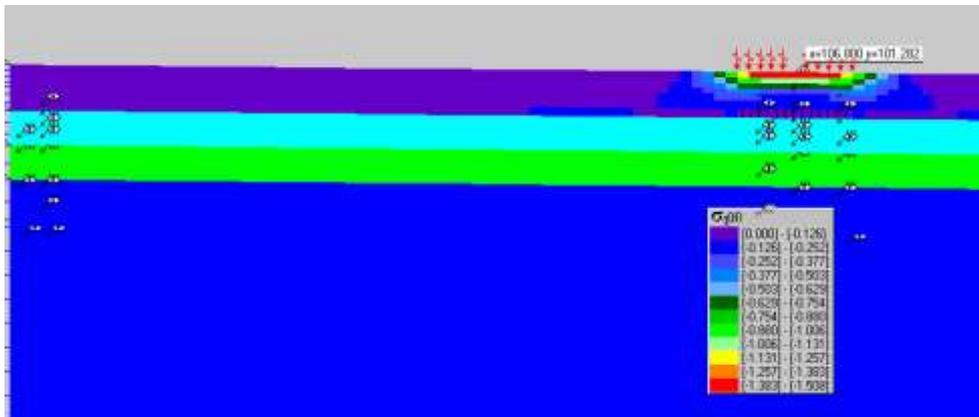


Рис. 7. Уровни значений главных напряжений σ_1 , МПа

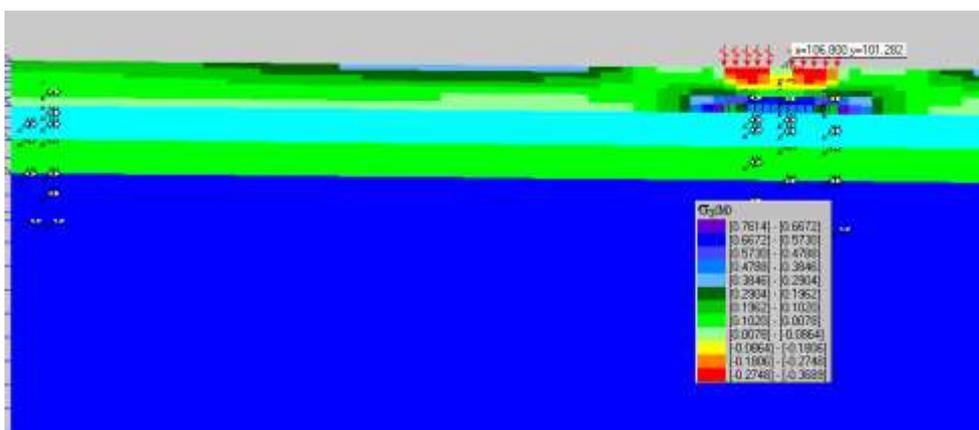


Рис. 8. Уровни значений главных напряжений σ_3 , МПа

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 $\sigma_i-\varepsilon_i$) и среднего напряжения σ (квадрант графика объемных деформаций $\sigma-\varepsilon$), 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).

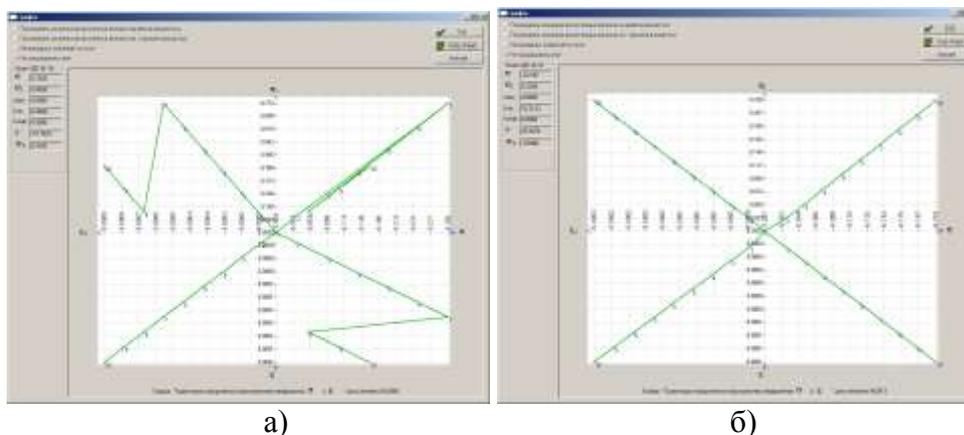


Рис. 9. Траектории нагружения в пространстве инвариантов тензора напряжений и относительных деформаций: деформации формоизменения σ_i - ε_i , траектории нагружения в пространстве σ_i - σ , деформации объема σ - ε , траектории нагружения в пространстве ε_i - ε : а) для КЭ нижнего слоя асфальтобетона под 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.: Издательство стандартов, 1989. – 9 с.
2. *Проектирование нежестких дорожных одежд* (ОДН 218.046-01)/Государственная служба дорожного хозяйства министерства транспорта Российской Федерации. – М.: 2001. – 143 с.
3. *СНиП 2.05.06-85**. Аэродромы/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 59 с.
4. *Горшков Н.И.* Совершенствование геомеханического обеспечения дорог // Наука и техника в дорожной отрасли. 2002. №4. – С. 6-9.
5. Горшков, Н.И. Альтернативная методика: Проблемы проектирования автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями / Н.И. Горшков, М.А. Краснов // Автомобильные дороги. – 2012. – №6. – С. 64-66.
6. Горшков, Н.И. Альтернативная методика: Проблемы проектирования автомобильных дорог с асфальтобетонными покрытиями / Н.И. Горшков, М.А. Краснов // Автомобильные дороги. – 2012. – №7. – С. 90-92.

7. Программа GenIDE32 для решения прикладных задач геомеханики в строительстве / Горшков Н.И., Краснов М.А. СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ. СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ № РОСС RU.СП15.Н00646, 28.10.2013 (www.femsoft.ru).
8. *Фадеев А.Б.* Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
9. *Рыбьев И.А.* Асфальтовые бетоны. Учеб. пособие для строительных вузов. – М.: Высшая школа, 1969. – 399 с.