

УДК [691.168:539.319](045)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИЗОЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ ЗАПОЛНИТЕЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА В УСЛОВИЯХ ОБЪЕМНОГО И ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЙ

*NUMERICAL MODELLING AND ANALYSIS
OF STRESS ISOLINES ON THE SURFACE
OF ASPHALT CONCRETE AGGREGATE
PARTICLES UNDER THREE - AND
TWO-DIMENSIONAL STRESSES*

С.Е. Кравченко,
кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Строительство и эксплуатация дорог» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь

В статье представлены результаты исследований изолиний напряжений на поверхности частиц заполнителя асфальтобетона в условиях его объемного и плоского напряженных состояний. Установлено, что решение различных задач при объемном напряженном состоянии может быть заменено решением при плоском напряженном состоянии с учетом коррелирующего коэффициента, равного приблизительно 1,5.

The article gives the results of studying stress isolines on the surface of asphalt concrete aggregate particles under three-dimensional and two-dimensional stress. It has been established that solution of different problems of three-dimensional stress state can be replaced by solution of two-dimensional stress problems taking into account the correlated factor approximately equal to 1,5.

ВВЕДЕНИЕ

Рассматривая теорию напряженного состояния применительно к асфальтобетону при оценке его прочности, в первую очередь следует учитывать условия его эксплуатации, которые определяют вид напряженного состояния в структуре асфальтобетона, характеризующийся соотношением величин, знаков и направлений нормальных и касательных напряжений в каждом его единичном объеме. Однако следует иметь в виду, что при оценке прочности асфальтобетона нет необ-

ходимости определять величину, знак и направление напряжений во всех точках его объема, а достаточно знать их экстремальные значения, определяемые как главные напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Напряженное состояние, при котором два любых главных напряжения равны нулю, а третье отличается от нуля, определяется как линейное. В случаях равенства нулю только одного главного напряжения и если три главных напряжения не равны нулю, соответственно имеют место, соответственно, плоское и объемное напряженные состояния [1].

Оценка прочностных и реологических показателей свойств асфальтобетона осуществляется по нормированным методикам [2], в соответствии с которыми в испытуемых образцах (цилиндрические и кубовидные образцы, прямоугольные балочки) развиваются линейные и плоские напряженные состояния. В реальных условиях эксплуатации покрытия в асфальтобетоне создается объемное напряженное состояние. Это обстоятельство не позволяет на стадии подбора асфальтобетона прогнозировать его поведение в реальных условиях эксплуатации. Принимая во внимание факт отсутствия в Республике Беларусь оборудования, позволяющего испытывать материал в условиях объемного напряженного состояния, одним из мероприятий для повышения качества асфальтобетона на стадии подбора следует определить установление корреляционной зависимости между напряжениями, возникающими при объемном и плоском напряженных состояниях.

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ИЗОЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ
НА ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ
ЗАПОЛНИТЕЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА
В УСЛОВИЯХ ЕГО ОБЪЕМНОГО
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ**

Если идеализировать структуру асфальтобетона со щебеночным заполнителем, исследуемый материал можно представить как композитный, состоящий из упругой матрицы (асфальтовый раствор) и зерен заполнителя (щебень) [3]. Зерна заполнителя могут иметь различную геометрическую форму и размеры. Статистический анализ геометрической формы заполнителя показал, что с некоторым приближением зерна могут быть представлены в кубовидной либо призматической форме с различным соотношением сторон. Известно, что наибольшая концентрация напряжений наблюдается в вершинах зерен заполнителя. Для изучения напряженного состояния вблизи вершины кубовидного и призматического ядра рассмотрен элемент, состоящий из пирамидальной части ядра и матрицы, испытывающий осевое сжатие. При этом задача решается для двух случаев: при потоке внутренних сил вдоль и поперек оси пирамидальной вершины.

Расчет выполнялся методом конечных элементов. Для построения конечно-элементной модели использованы кубические конечные элементы, содержащие по восемь узлов и имеющие 48 степеней свободы. Объем асфальтобетона в форме призмы (рис. 1) разделен на конечные элементы. Конечные элементы внутри пирамидальной части ядра и в матрице отличались физическими коэффициентами E и ν . Поставлены граничные условия: на площадках приложения нагрузки перемещения узлов совместны, то есть одинаковы. Закрепление элемента объема обеспечивалось связями по направлениям осей X, Y, Z . Сжимающая нагрузка передавалась через узлы.

Для расчета напряженного состояния использован программный комплекс «Лира». Численная модель построена из объемных конечных элементов кубовидной формы.

Выделенный объем, содержащий матрицу и пирамидальную часть ядра заполнителя, разделен на 7497 конечных элементов. Для конечных элементов, расположенных внутри пирамидальной ча-

сти ядра заполнителя, коэффициент Пуассона и плотность материала приняты равными: $\nu = 0,28, \rho = 2,65 \text{ т/м}^3$. Модуль упругости E для разных вариантов расчета задавался равным 10, 50, 90 ГПа. Механические характеристики для матрицы, состоящей из минерального порошка, песка и гранитного отсева, приняты для всех вариантов расчета одинаковыми и равными: $E = 1,5 \text{ ГПа}, \nu = 0,36, \rho = 2,31 \text{ т/м}^3$.

Рассмотрено два случая напряженного состояния выделенного объема асфальтобетона – случай продольного и случай поперечного потока внутренних сил (рис. 1). В обоих случаях нагрузка в виде сосредоточенных сил прикладывалась к узлам конечно-элементной модели. Значение силы зависело от места расположения узла: на внутренние узлы грани прикладывались силы, равные 1 Н; на узлы, расположенные на ребрах, 0,5 Н и на узлы в вершинах - 0,25 Н. Размер стороны кубического конечного элемента принят равным 1 мм. Таким образом, средняя интенсивность потока внутренних сил составляла $\sigma_m = 1 \text{ МПа}$. Узлы, в которых приложены силы, объединялись в группу по условию равенства перемещений вдоль потока внутренних сил. Узлы, расположенные на стороне, противоположной нагрузке, прикреплялись связями, препятствующими перемещениям вдоль потока внутренних сил.

С использованием программного комплекса «Лира» выполнен расчет конечно-элементной модели асфальтобетона с включением пирамидальной формы. В результате расчета для случая продольного потока внутренних сил получены значения главных напряжений σ_1, σ_3 , эквивалент-

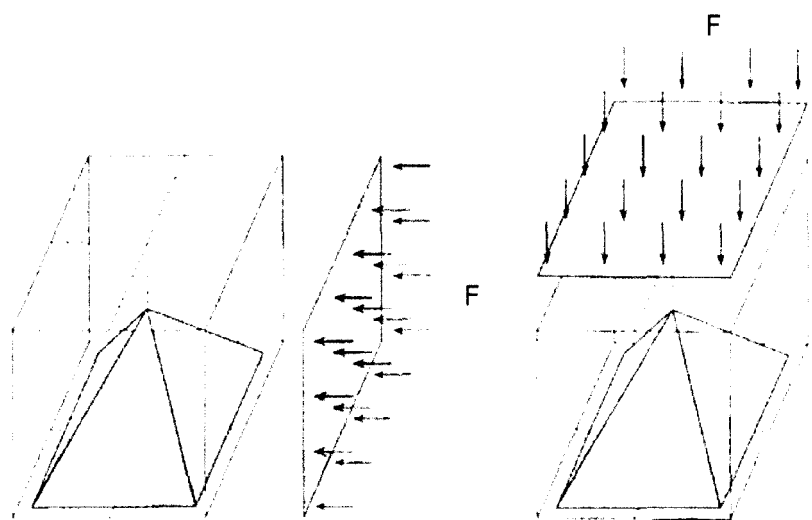


Рисунок 1 - Действие поперечного и продольного потока сил на пирамидальную часть зерна и матрицу

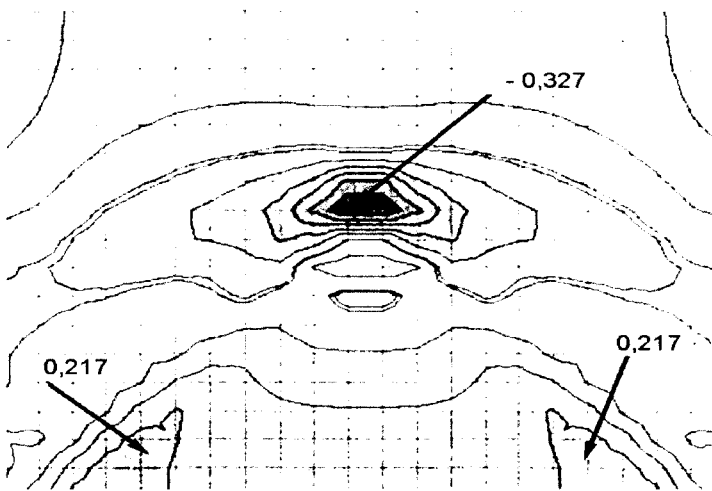


Рисунок 2 - Карта изолиний главного напряжения σ_1 при продольном потоке внутренних сил в условиях объемного напряженного состояния

ных напряжений по теории Кулона σ_{eq} и вертикальных нормальных напряжений σ_z . Для главных напряжений σ_1 и эквивалентных напряжений σ_{eq} построены карты изолиний (рис. 2, 3).

Анализ результатов показывает, что в отличие от случая однородного материала, в рассматриваемом объеме появляются главные напряжения σ_1 , которые концентрируются вблизи вершины пирамидальной части ядра заполнителя и принимают здесь отрицательные значения. Однако следует отметить, что на большей части объема главное напряжение σ_1 является растягивающим, а у основания пирами-

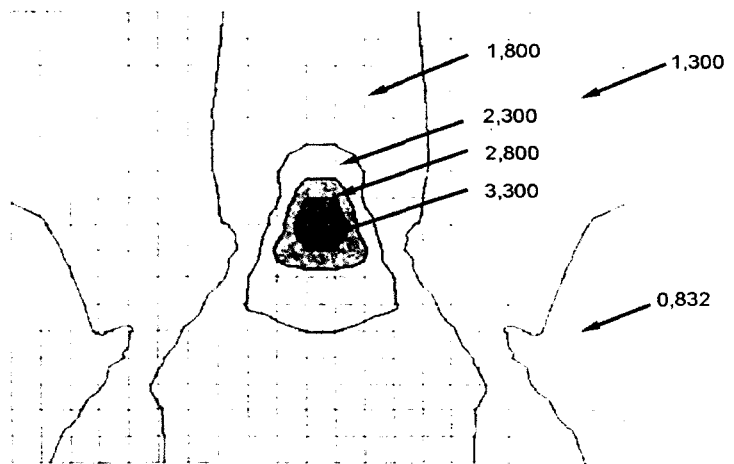


Рисунок 3 - Карта изолиний эквивалентного напряжения σ_{eq} по теории прочности Кулона при продольном потоке внутренних сил в условиях объемного напряженного состояния

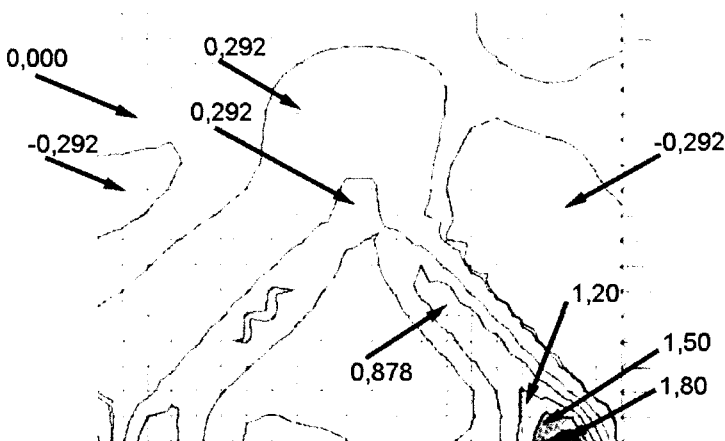


Рисунок 4 - Карта изолиний главного напряжения σ_1 при поперечном потоке внутренних сил в условиях объемного напряженного состояния

дальной части ядра вблизи его поверхности достигает максимального значения (рис. 2).

Установлено, что по всему исследуемому объему проявляются только сжимающие главные напряжения σ_3 . На вершине пирамидальной части ядра наблюдается их значительная концентрация, где они и достигают своих максимальных значений.

Распределение эквивалентных напряжений по теории прочности Кулона по своему характеру подобно распределению главных напряжений σ_3 . Однако их концентрация больше, а значения выше (рис. 3).

Аналогичное решение получено и для случая поперечного потока внутренних сил. Анализ результатов расчета показывает, что в отличие от случая с продольным потоком внутренних сил, значительной

концентрации напряжений на острие пирамидальной части ядра заполнителя не наблюдается. На поле главных напряжений σ_1 преобладают растягивающие напряжения. Их наибольшие значения появляются на боковой поверхности ядра (рис. 4).

Небольшая концентрация главного напряжения σ_3 наблюдается у вершины пирамидальной части заполнителя, здесь же она достигает и своего максимального значения.

Имеет место концентрация эквивалентного напряжения по теории проч-

ности Кулона у вершины пирамидальной части $\sigma_{eq} = 2,00$ МПа. Несколько большего значения эквивалентные напряжения достигают у боковых поверхностей ядра (рис. 5).

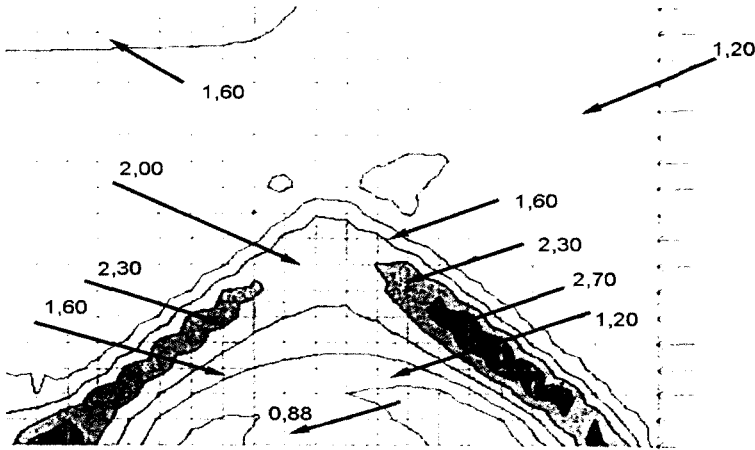


Рисунок 5 - Карта изолиний эквивалентного напряжения σ_{eq} по теории прочности Кулона при поперечном потоке внутренних сил в условиях объемного напряженного состояния

На основании результатов анализа составлены таблицы 1, 2 коэффициентов концентрации напряжений у вершины пирамиды в условиях объемного напряженного состояния.

Здесь κ_{m1}^0 , κ_{m3}^0 , κ_{meq}^0 - соответственно, коэффициенты концентрации главных напряжений σ_1 , σ_3 и эквивалентного напряжения σ_{eq} при продольном потоке внутренних сил в условиях объемного напряженного состояния; κ_{n1}^0 , κ_{n3}^0 , κ_{neq}^0 - то же при поперечном потоке внутренних сил.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЧАСТИЦ ЗАПОЛНИТЕЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА В УСЛОВИЯХ ЕГО ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Рассмотрена аналогичная задача при плоском напряженном состоянии образца асфальтобетона. В матрицу (асфальтовый раствор) включена кли-

Таблица 1 - Напряжения и коэффициенты концентрации у вершины пирамидального конца зерна при продольном потоке сил в условиях объемного напряженного состояния

E, ГПа	Напряжение σ_1		Напряжение σ_3		Напряжение σ_{eq}	
	Значение, МПа	Коэффициент концентрации	Значение, МПа	Коэффициент концентрации	Значение, МПа	Коэффициент концентрации
1,5	0,00	—	-1,00	1,00	1,00	1,00
10,0	-0,27	0,27	-2,40	2,40	2,50	2,50
50,0	-0,33	0,33	-3,20	3,20	3,30	3,30
90,0	-0,33	0,33	-3,30	3,30	3,50	3,50
	$\kappa_{m1}^0 = 0,31$		$\kappa_{m3}^0 = 2,97$		$\kappa_{meq}^0 = 3,10$	

Таблица 2 - Напряжения и коэффициенты концентрации у вершины пирамидального конца зерна при поперечном потоке сил в условиях объемного напряженного состояния

E, ГПа	Напряжение σ_1		Напряжение σ_3		Напряжение σ_{eq}	
	Значение, МПа	Коэффициент концентрации	Значение, МПа	Коэффициент концентрации	Значение, МПа	Коэффициент концентрации
1,5	0,00	—	-1,00	1,00	1,00	1,00
10,0	-0,34	0,34	-1,20	1,20	1,20	1,20
50,0	-0,58	0,58	-1,00	1,00	1,20	1,20
90,0	-0,65	0,65	-1,00	1,00	1,20	1,20
	$\kappa_{n1}^0 = 0,52$		$\kappa_{n3}^0 = 1,07$		$\kappa_{neq}^0 = 1,20$	

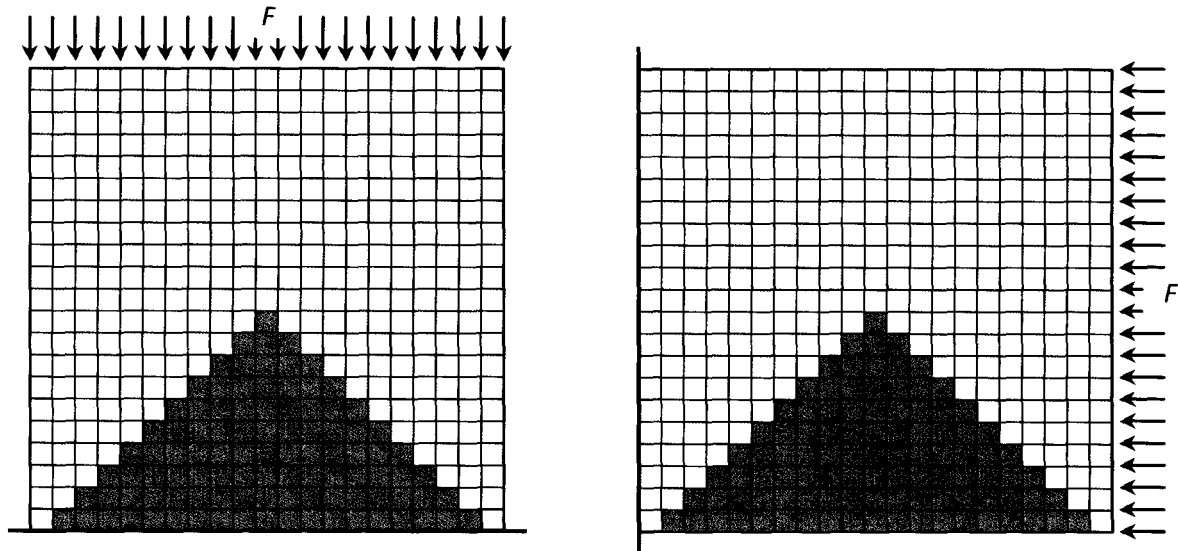


Рисунок 6 - Действие продольного и поперечного потока сил на клиновидную часть ядра заполнителя в условиях плоского напряженного состояния

ноподобная часть ядра заполнителя. Физические параметры материалов приняты такими же, как и в рассмотренных выше примерах. Нагрузка прикладывается по направлению оси клина (продольный поток внутренних сил) и перпендикулярно к ней (поперечный поток внутренних сил).

Для расчета использован метод конечных элементов. Модель построена из объемных конечных элементов кубовидной формы, расположенных в один ряд. Каждый конечный элемент имеет четыре узла, размещенные в его углах. Каждый узел имеет шесть степеней свободы: перемещения по направлениям координатных осей X, Y, Z и повороты около этих же осей.

На краю модели, где передается нагрузка, все узлы объединены в группы, имеющие одинаковое перемещение вдоль направления поля внутренних сил. С противоположной стороны модели узлы прикреплены к опоре связями, также параллельными направлению нагрузки.

Расчет выполнен с помощью программного комплекса «Лира». Для построения конечно-элементной модели использован 441 конечный элемент (рис. 6). Нагрузка интенсивностью 1 МПа собрана в сосредоточенные силы, которые приложены к узлам: $F = 0,50$ Н ($F = 0,25$ Н к крайним узлам). Размер стороны кубического конечного элемента принят равным 1 мм. Элементы разделены по типам жесткости на две группы. Для конечных элементов, которые расположены в матрице, назначаются физические параметры: $E = 1,5$ ГПа, $\nu = 0,36$ и $\rho = 2,31$ т/м³.

Расчет был выполнен для трех вариантов, каждый из которых отличался жесткостью ядра. Поэтому для конечных элементов, расположенных в ядре заполнителя, физические параметры принимаются разными: $E = 10$ ГПа, $E = 50$ ГПа, $E = 90$ ГПа, $\nu = 0,28$, $\rho = 2,31$ т/м³.

В отличие от случая однородного материала, в исследуемом объеме появляются главные напряжения σ_1 , которые вблизи вершины клиновидной части ядра имеют наибольшее значение и являются сжимающими. На всей остальной части исследуемого объема главные напряжения σ_1 – растягивающие (рис. 7).

Совсем по-другому распределяются главные

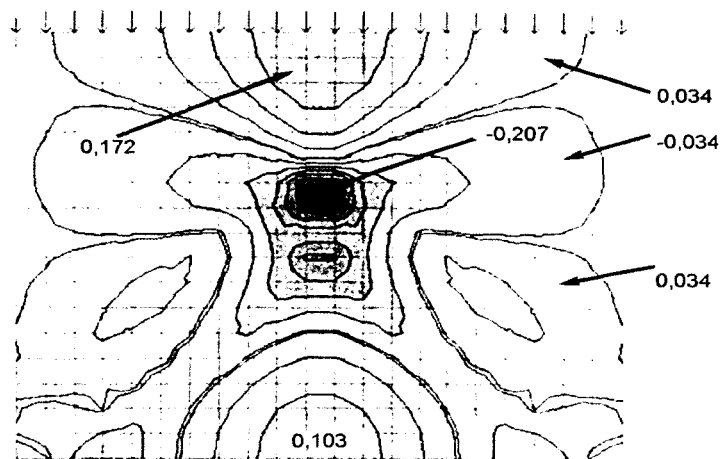


Рисунок 7 - Карта изолиний главных напряжений σ_1 , при продольном потоке внутренних сил в условиях плоского напряженного состояния

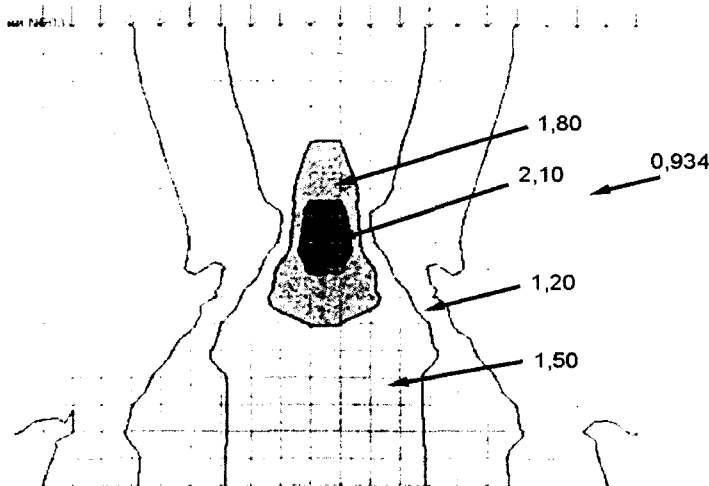


Рисунок 8 - Карта изолиний эквивалентного напряжения σ_{eq} по теории прочности Кулона при продольном потоке внутренних сил в условиях плоского напряженного состояния

напряжения σ_3 . Концентрация наблюдается у вершины клиноподобной части ядра. На большей части объема эти главные напряжения достигают значений, которые меньше средних.

На рисунке 8 приведена карта изолиний эквивалентного напряжения σ_{eq} по теории прочности Кулона при продольном потоке внутренних сил в условиях плоского напряженного состояния.

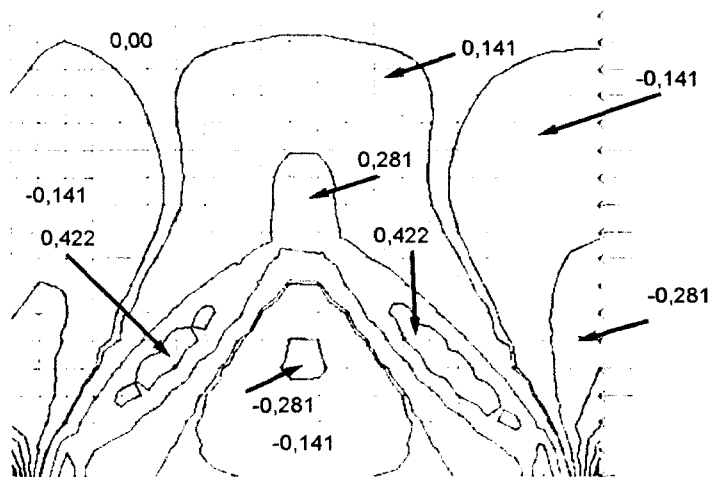


Рисунок 9 - Карта изолиний главного напряжения σ_1 при поперечном потоке внутренних сил в условиях плоского напряженного состояния

Аналогичный расчет и исследования введены и для случая поперечного потока внутренних сил. Главные напряжения σ_1 концентрируются не у вершины клиноподобной части ядра, а на его боковых поверхностях. На большей исследуемой части асфальтобетонного образца главное напряжение σ_1 - растягивающее (рис. 9).

Эквивалентное напряжение σ_{eq} по теории прочности Кулона (рис. 10) и главное напряжение σ_3 по всему исследуемому объему имеют один знак. Их значения в этом месте примерно равны среднему значению напряжения. Концентрация вблизи вершины

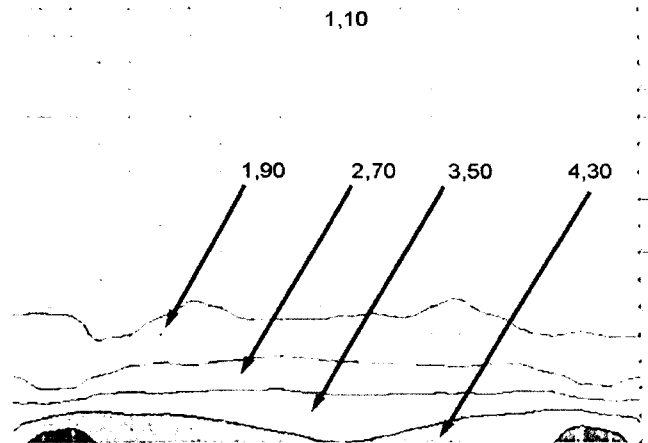


Рисунок 10 - Карта изолиний эквивалентного напряжения σ_{eq} по теории прочности Кулона при поперечном потоке внутренних сил в условиях плоского напряженного состояния

клиноподобной части ядра не наблюдается.

На основании результатов анализа составлены таблицы 3, 4 коэффициентов концентрации напряжений у вершины клина в условиях плоского напряженного состояния.

Здесь K_{m1}^P , K_{m3}^P , K_{meq}^P - соответственно, коэффициенты концентрации главных напряжений σ_1 , σ_3 и эквивалентного напряжения σ_{eq} при продольном потоке внутренних сил в условиях плоского напряженного состояния; K_{n1}^P , K_{n3}^P , K_{neq}^P - то же при поперечном потоке внутренних сил.

Сравнивая коэффициенты концентрации для объемного и плоского напряженных состояний, можно утверждать, что имеет место значительное отличие. Для объемного

Таблица 3 - Напряжения и коэффициенты концентрации у вершины клиновидного конца зерна при продольном потоке сил в условиях плоского напряженного состояния

E, МПа	Напряжение σ_1		Напряжение σ_3		Напряжение σ_{eq}	
	Значение, МПа	Коэффициент концентрации	Значение, МПа	Коэффициент концентрации	Значение, МПа	Коэффициент концентрации
1,5	0,00	-	-1,00	1,00	1,00	1,00
10,0	-0,18	0,18	-1,80	1,80	1,20	1,80
50,0	-0,21	0,21	-2,10	2,10	1,20	2,10
90,0	-0,21	0,21	-2,10	2,10	1,20	2,20
	$\kappa_{m1}^p = 0,20$		$\kappa_{m3}^p = 2,00$		$\kappa_{meq}^p = 2,03$	

Таблица 4 - Напряжения и коэффициенты концентрации у вершины клиновидного конца зерна при поперечном потоке сил в условиях плоского напряженного состояния

E, МПа	Напряжение σ_1		Напряжение σ_3		Напряжение σ_{eq}	
	Значение, МПа	Коэффициент концентрации	Значение, МПа	Коэффициент концентрации	Значение, МПа	Коэффициент концентрации
1,5	0,00	-	-1,00	1,00	1,00	1,00
10,0	-0,22	0,22	-0,85	0,85	0,94	0,94
50,0	-0,28	0,28	-1,00	1,00	1,10	1,10
90,0	-0,31	0,31	-1,10	1,10	1,20	1,20
	$\kappa_{n1}^p = 0,27$		$\kappa_{n3}^p = 0,98$		$\kappa_{neq}^p = 1,08$	

напряженного состояния при продольном потоке внутренних сил концентрация напряжений вблизи вершины пирамидальной части зерна в полтора раза больше, чем концентрация напряжений у вершины клиновидной части в условиях плоского напряженного состояния (таблицы 1, 3):

$$\frac{\kappa_{m1}^o}{\kappa_{m1}^p} = \frac{0,31}{0,2} = 1,55 ; \quad \frac{\kappa_{m3}^o}{\kappa_{m3}^p} = \frac{2,97}{2,00} = 1,48 ;$$

$$\frac{\kappa_{meq}^o}{\kappa_{meq}^p} = \frac{3,10}{2,03} = 1,53 .$$

При поперечном потоке внутренних сил концентрация вблизи вершины зерна заполнителя для напряжений σ_3 и σ_{eq} не наблюдается: они практически совпадают и по знакам, и по значениям. Отличие имеет место только для главного напряжения σ_1 - для объемного напряженного состояния его значение больше, чем для плоского напряженного состояния (таблицы 2, 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ изолиний напряжений на поверхности частиц заполнителя асфальтобетона указывает на существование стабильного отличия в концентрации напряжений (приблизительно в пределах 40 %-50 %) при объемном и плоском напряженных состояниях для случая продольного потока внутренних сил. Поэтому решение различных задач при объемном напряженном состоянии может быть заменено решением при плоском напряженном состоянии с учетом коррелирующего коэффициента, равного приблизительно 1,5.

Литература

1. Дарков, А.В., Шпиро, Г.С. *Сопротивление материалов*. - М.: Высшая школа, 1965. - 762 с.
2. *Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытаний: СТБ 1115-2004*. - Введ. 2005-01-01. - Минск: Минстройархитектуры, 2004.
3. Кравченко, С.Е. *Структурная модель асфальтобетона и методика оценки его напряженно-деформированного состояния / С.Е. Кравченко, Д.Л. Сериков // Автомобильные дороги и мосты*. - 2008. - № 1. - С. 61-64.