

REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSN 2224-5227

Volume 5, Number 309 (2016), 156 – 172

B.B. Teltayev¹, K.A. Aitbayev², S.A. Ablaliev³

^{1,2}Kazakhstan Highway Research Institute, 2A Nurpeissov St., Almaty, Republic of Kazakhstan, ³Committee of Roads, Ministry for Investments and Development, 32/1 Kabanbai batyr St., Astana, Republic of Kazakhstan
bagdatbt@yahoo.com, aytbaev53@mail.ru, Ablaliev.s@mob.gov.kz

**IMPACT OF UNDERGROUND COLLECTOR
ON STRESS STRAIN BEHAVIOUR OF PAVEMENT STRUCTURE**

Abstract: The article shows the results of solving for plane elasticity problem by finite element method for multilayer pavement structure. Due to the impact of traffic load the stress strain behavior of pavement structure is complicated by availability of inflexible underground collector in subgrade of pavement. The results of comparison for components of displacement vector and stress tensor are shown in graphical form with underground reinforced concrete collector and without it. The analysis is given for the results obtained.

Key words: pavement, underground reinforced concrete collector, plane elasticity problem, finite element method, displacements, strains, stresses.

УДК 625.75:624.042:519.34

Б. Б.Телтаев¹, К.А.Айтбаев², С.А. Аблалиев³

^{1,2}Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт, Нурпеисова 2А, Алматы, Республика Казахстан, ³Комитет автомобильных дорог, Министерство по инвестициям и развитию, Кабанбай батыра 32/1, Астана, Республика Казахстан

**ВЛИЯНИЕ ПОДЗЕМНОГО КОЛЛЕКТОРА
НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
ДОРОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ**

Аннотация: В статье приведены результаты решения плоской задачи теории упругости методом конечных элементов для многослойной дорожной конструкции. Напряженно-деформированное состояние дорожной конструкции, обусловленное действием транспортной нагрузки, усложняется наличием в грунтовом основании дорожной одежды жесткого подземного железобетонного коллектора. Результаты сравнения компонентов вектора перемещений и тензора напряжений в конструкциях автомобильных дорог с подземным железобетонным коллектором и без него представлены в графическом виде. Приведен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: дорожная одежда, подземный железобетонный коллектор, плоская задача теории упругости, метод конечных элементов, перемещения, деформации, напряжения.

Введение

Деформации и напряжения в городских дорожных конструкциях, возникающие под действием подвижной транспортной нагрузки и температуры окружающей среды, усиливаются под влиянием работы тепловых сетей, расположенных под проезжей частью.

Кроме температурного влияния, подземные тепловые сети вызывают еще воздействия механического характера, так как жесткость железобетонных коллекторов, в которые вмонтированы металлические трубы подачи горячей и охлажденной воды, существенно превышает жесткость грунтового основания дорог.

Исследования авторов особенностей распределения напряжения и деформации в городской

дорожной конструкции с подземным коллектором были начаты с середины 90-ых годов прошлого столетия [1-3] и в настоящее время продолжают [4].

Целью настоящей работы является более углубленное исследование с помощью разработанной конечно-элементной математической модели напряженно-деформированного состояния городской дорожной конструкции с подземным железобетонным коллектором под действием автомобильной нагрузки. Для оценки степени влияния подземного коллектора на напряженно-деформированное состояние в дорожной конструкции, в работе приведено сравнение картин распределения напряжений и деформации в дорожной конструкции с подземным железобетонным коллектором, и без него.

1 Постановка задачи

Для построения математической модели городской дорожной конструкции с подземными железобетонными коллекторами рассмотрим поперечное сечение городской дороги.

Дорожная конструкция состоит из трехслойной асфальтобетонной дорожной одежды и основания дорожной одежды из щебеночной смеси подобранного состава, покоящегося на слое из песчано-гравийной смеси, в котором устроены железобетонные коллекторы.

Применяемый здесь железобетонный коллектор является серийным изделием и имеет следующие геометрические размеры: общая ширина спаренного коллектора $l_k = 2.80$ м и их высота $h_k = 1.40$ м. Схематический вид дорожной конструкции представлен на рисунке 1.

Геометрические размеры конструктивных слоев и механические свойства материалов конструктивных элементов приведены в таблице.

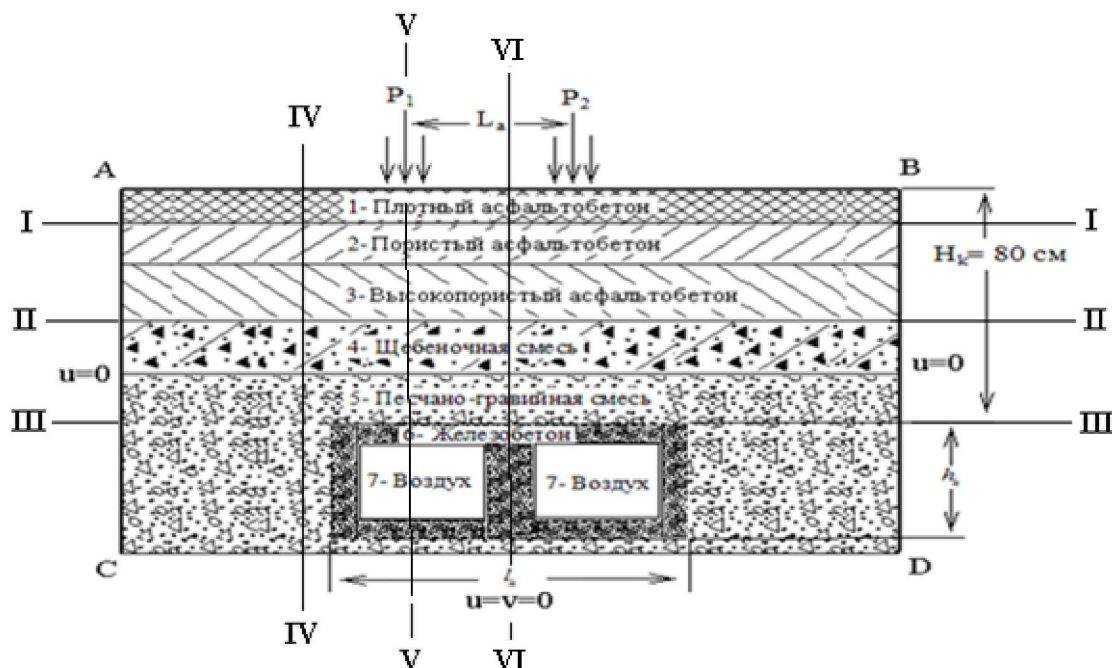


Рисунок 1 – Схематический вид дорожной конструкции: 1 – плотный асфальтобетон; 2 – асфальтобетон пористый; 3 – высокопористый асфальтобетон; 4 – щебеночная смесь подобранного состава; 5 – песчано-гравийная смесь; 6 – железобетонные стенки подземных коллекторов; 7 – воздух внутри коллекторов; L_a – ширина колеи транспортного средства; H_k – глубина заложения железобетонных коллекторов; P_1, P_2 – нагрузки от колес транспортного средства; u, v – компоненты перемещения точек на границах в направлении координатных осей x и y соответственно

В настоящей работе рассматривается невесомая плоская задача статики теории упругости.

На боковых вертикальных границах исследуемой области (рисунок 1, линий AC и BD) в силу их удаленности от места приложения вертикальных транспортных нагрузок и от границ коллекторов отсутствуют горизонтальные перемещения ($u = 0$), а на нижней границе исследуемой области (рисунок 1, линия CD) запрещены все перемещения ($u = v = 0$).

Таблица – Характеристики конструктивных элементов

№	Материал конструктивного слоя	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона, ν	Плотность, кг/м ³	Высота слоя, м
1	Плотный асфальтобетон	3200	0,25	2400	0,05
2	Пористый асфальтобетон	2000	0,25	2300	0,10
3	Высокопористый асфальтобетон	1400	0,25	2100	0,12
4	Щебеночная смесь	250	0,35	1900	0,33
5	Песчано-гравийная смесь	180	0,35	1900	-
6	Железобетон коллектора	3000	0,20	2750	1,4
7	Воздух внутри коллекторов	-	-	-	-

Исследуемая область представляет собой прямоугольник шириной 10.1 м и высотой 3.15 м.

Вес автомобиля, рассчитанный из номинальной транспортной нагрузки с интенсивностью $q=0.6$ МПа и передаваемый через два колеса автомобиля, прикладывается к верхней горизонтальной границе в виде распределенных вертикальных нагрузок $P_1 = P_2$ (рисунок 1) в соответствующих узловых точках.

2 Теоретические основы

Так как задача решается в перемещениях, и на границах исследуемой области задаются их значения, для построения уравнения равновесия выбирается метод минимизации полной потенциальной энергии системы, связанной с работой напряжений и внешней приложенной нагрузки [5].

Полная потенциальная энергия системы в матричной форме запишется так [5]:

$$\begin{aligned} \Pi = \sum_{e=1}^E \int_{V^{(e)}} \frac{1}{2} \{U\}^T [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] \{U\} dV - \int_{V^{(e)}} \{U\}^T [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] \{\varepsilon_0^{(e)}\} dV - \\ - \int_{V^{(e)}} \{U\}^T [N^{(e)}]^T \begin{Bmatrix} X^{(e)} \\ Y^{(e)} \\ Z^{(e)} \end{Bmatrix} dV - \int_{S^{(e)}} \{U\}^T [N^{(e)}]^T \begin{Bmatrix} p_x^{(e)} \\ p_y^{(e)} \\ p_z^{(e)} \end{Bmatrix} dS - \{U\}^T \{P\}. \end{aligned} \quad (1)$$

Для минимизации полной потенциальной энергии формулу (1) нужно продифференцировать по вектору перемещений $\{U\}$, и результат приравнять к нулю:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi}{\partial \{U\}} = \sum_{e=1}^E \left[\int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] dV \{U\} - \int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] \{\varepsilon_0^{(e)}\} dV - \right. \\ \left. - \int_{V^{(e)}} [N^{(e)}]^T \begin{Bmatrix} X^{(e)} \\ Y^{(e)} \\ Z^{(e)} \end{Bmatrix} dV - \int_{S^{(e)}} [N^{(e)}]^T \begin{Bmatrix} p_x^{(e)} \\ p_y^{(e)} \\ p_z^{(e)} \end{Bmatrix} dS \right] - \{P\} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Интегралы в формуле (2) определяют вектор узловой нагрузки $\{f^{(e)}\}$ и матрицу жесткости элемента $[k^{(e)}]$. В таком случае, условие минимизации полной потенциальной энергии кратко можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{U\}} = \sum_{e=1}^E \left[[k^{(e)}] \{U\} + \{f^{(e)}\} \right] = 0$$

или в виде системы линейных алгебраических уравнений равновесия

$$[K] \{U\} = \{F\}, \quad (3)$$

где

$$[K] = \sum_{e=1}^E [k^{(e)}] \quad \text{и} \quad \{F\} = \sum_{e=1}^E \{f^{(e)}\}.$$

Здесь матрица $[k^{(e)}]$ определяется через объемный интеграл как

$$[k^{(e)}] = \int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] dV, \quad (4)$$

а вектор узловой нагрузки $\{f^{(e)}\}$ – по формуле

$$\begin{aligned} \{f^{(e)}\} = & - \int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] \{\varepsilon_0^{(e)}\} dV - \int_{V^{(e)}} [N^{(e)}]^T \begin{Bmatrix} X^{(e)} \\ Y^{(e)} \\ Z^{(e)} \end{Bmatrix} dV - \\ & - \int_{S^{(e)}} [N^{(e)}]^T \begin{Bmatrix} p_x^{(e)} \\ p_y^{(e)} \\ p_z^{(e)} \end{Bmatrix} dS \quad \Big] - \{P\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Так как в рассматриваемой математической модели дорожной конструкции деформирование проходит в режиме плоской деформации, то матрица упругости $[D^{(e)}]$ определяется по формуле [5]:

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν в формуле (6) взяты для изотропных материалов.

Для численной реализации математической модели разработана расчетная программа на MATLAB. Вектор узловых перемещений, полученный в результате решения уравнения равновесия (3) имеет вид

$$\{U\} = \{u_1 \ u_2 \ \dots \ u_{NP} \ u_{1+NP} \ u_{2+NP} \ \dots \ u_{2*NP}\}, \quad (7)$$

где NP – общее число узлов в расчетной схеме. Здесь через $u_i, i = \overline{1, NP}$ обозначены горизонтальные, а через $u_{i+NP} = v_i, i = \overline{1, NP}$ – вертикальные перемещения узлов.

3 Проверка правильности граничных условий

Степень влияния жесткого подземного коллектора на уровень деформирования дорожной конструкции под действием транспортной нагрузки наиболее полно показывают графики изменения вертикальных перемещений u_y точек горизонтальных сечений (рисунок 2), расположенных на глубинах $h=0$ см, $h=45$ см и $h=80$ см. Здесь глубина $h=0$ см соответствует поверхности дорожного покрытия, глубина $h=80$ см – поверхности подземных коллекторов. Из рисунка 2 видно что, визуально заметная часть вертикальных перемещений под действием веса автомобиля распространяется до расстояния 150-170 см от границ коллекторов. Из него же видно экранирующий эффект коллекторов на развитие вертикальных перемещений. Например, на глубине $h=80$ см (уровень поверхности коллектора) вертикальное перемещение практически отсутствует.

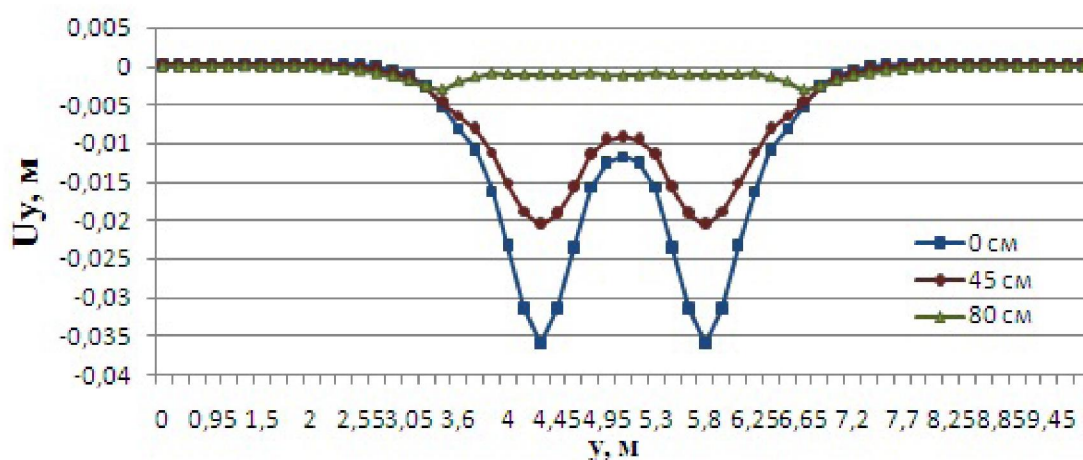


Рисунок 2 – Графики изменения вертикальных перемещений u_y в конструкции с коллектором на глубинах $h=0$ см, $h=45$ см и $h=80$ см

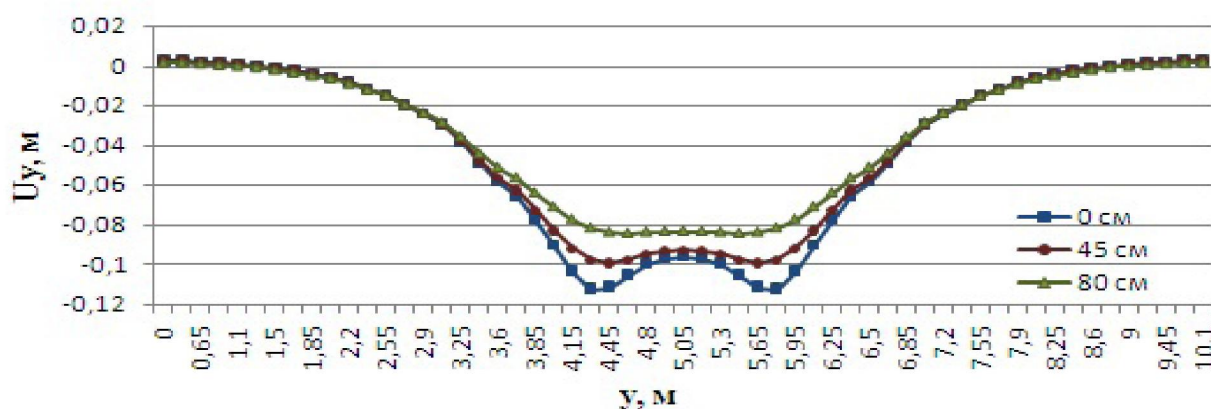


Рисунок 3 – Графики изменения вертикальных перемещений u_y в конструкции без коллектора на глубинах $h=0$ см, $h=45$ см и $h=80$ см

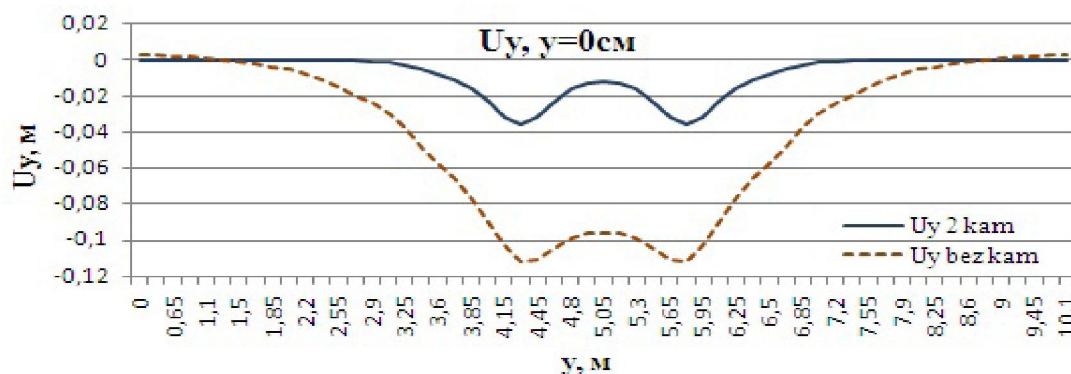


Рисунок 4 – Графики изменения вертикальных перемещений u_y в конструкции с коллектором (Uy 2kam) и без коллектора (Uy bezkam) на глубинах $h=0$ см, $h=45$ см и $h=80$ см

Незначительное вертикальное перемещение появляется лишь в областях, расположенных за границами коллектора, которое постепенно затухает на расстоянии 150-170 см от них. Однако, и этих незначительных вертикальных перемещений достаточно, чтобы на практике на дорожном покрытии наблюдались остаточные деформации в виде просадок и продольных трещин.

Картина развития вертикальных перемещений в конструкции с коллектором на других глубинах по характеру полностью совпадает с картиной деформирования горизонтальных слоев дорожной конструкции без коллектора (рисунок 3), хотя в первом случае вертикальные перемещения точек горизонтальных слоев по величине намного уступают вертикальным перемещениям соответствующих слоев дорожной конструкции без коллектора. Для количественной оценки степени различия деформирования двух видов конструкций, на рисунке 4 приведено сравнение вертикальных перемещений поверхностей дорожных покрытий ($h=0$ см) дорожных конструкций с подземным коллектором и без него. Здесь через Uy 2 kam обозначено вертикальное перемещение поверхности дорожного покрытия автомобильной дороги с подземным коллектором. Соответственно через Uy bez kam – без подземного коллектора.

Для улучшения наглядности на графиках рисунков 2-4 значения вертикальных перемещений точек Uy представлены в 100кратно увеличенном виде.

4 Напряженно-деформированное состояние дорожной конструкции

Соотношения связи между деформациями точек конечного элемента и перемещениями узловых точек $\{U\} = \{u_1 \ u_2 \ \dots \ u_{NP} \ u_{1+NP} \ u_{2+NP} \ \dots \ u_{2*NP}\}$ в матричной форме имеют вид [5]

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_i & c_j & c_k \\ c_i & c_j & c_k & b_i & b_j & b_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \\ v_i \\ v_j \\ v_k \end{Bmatrix}, \quad (8)$$

где b_α, c_α ($\alpha = i, j, k$) получены в результате дифференцирования функций формы N_α ($\alpha = i, j, k$) [5] по координатам. Здесь A – площадь конечного элемента, i, j и k – глобальные номера узлов треугольного элемента, а u_α ($\alpha = i, j, k$) и v_α ($\alpha = i, j, k$) – горизонтальные и вертикальные перемещения соответствующих узлов.

Так как компоненты перемещения узлов каждого элемента u_i, u_j, u_k, v_i, v_j и v_k постоянны, то и деформации во всех точках конечного элемента, определяемые по формуле (8), будут постоянными в пределах каждого конечного элемента.

Для определения компонентов напряжений σ_x , σ_y и τ_{xy} воспользуемся законом Гука [6]

$$\sigma_x = E\varepsilon_x, \quad \sigma_y = E\varepsilon_y, \quad \tau_{xy} = G\gamma_{xy}, \quad (9)$$

где $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль сдвига. Здесь компоненты деформаций ε_{xx} , ε_{yy} и γ_{xy} определяются по формулам (8).

Для проведения сравнительного анализа напряженного состояния в дорожных конструкциях с подземным железобетонным коллектором и без него предварительно назначим характерные сечения в расчетной области.

Сначала выберем горизонтальные сечения I-I, II-II и III-III, расположенные на глубинах $h=5$ см, $h=45$ см и $h=80$ см (рисунок 1), охватывающие дорожную одежду и уровень поверхности коллекторов. Затем, для исследования закономерностей развития по глубине тех же компонентов напряжений назначим три вертикальных сечения IV-IV, V-V и VI-VI.

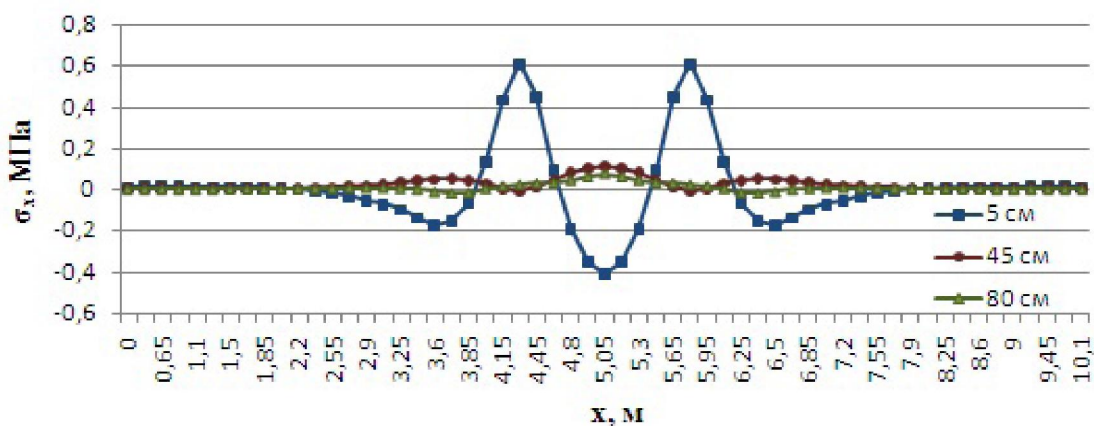


Рисунок 5 – Графики изменения нормальных напряжений σ_x в конструкции с коллектором в сечениях I-I, II-II и III-III (глубины $h=5$ см, $h=45$ см и $h=80$ см)

Первое сечение IV-IV будет расположено на расстоянии 10 см от левой вертикальной границы подземного коллектора. В качестве второго – выберем сечение V-V, проходящее по центру вертикальной распределенной нагрузки от левого колеса автомобиля, а третье сечение VI-VI будет проходить по вертикальной линии симметрии расчетной схемы (рисунок 1), т.е. ровно посередине исследуемой области.

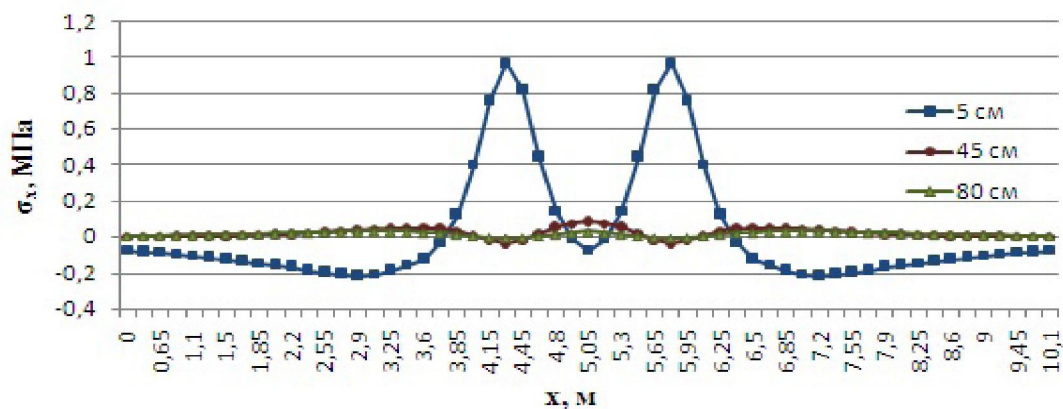


Рисунок 6 – Графики изменения нормальных напряжений σ_x в конструкции без коллектора в сечениях I-I, II-II и III-III (глубины $h=5$ см, $h=45$ см и $h=80$ см)

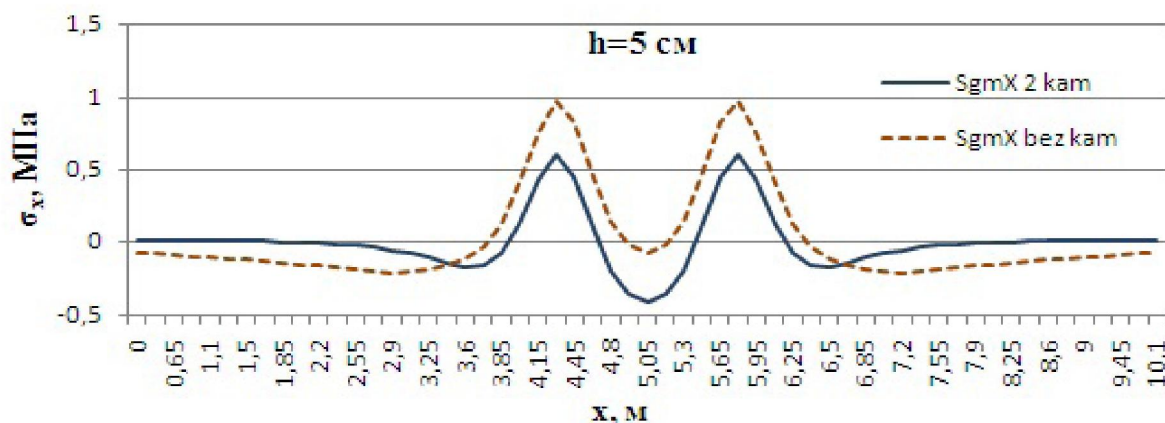


Рисунок 7 – Графики сравнения нормальных напряжений σ_x в конструкциях с коллектором и без него на глубине $h=0$ см

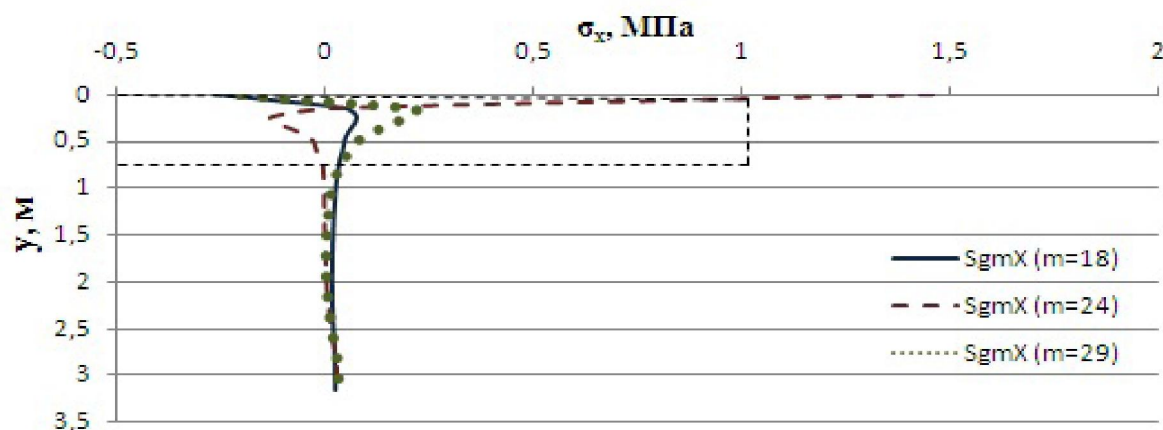


Рисунок 8 – Графики изменения нормальных напряжений σ_x в конструкции без коллектора в сечениях IV-IV, V-V и VI-VI

На рисунках 5 и 6 приведены графики изменения нормальных напряжений σ_x на глубинах $h=5$ см, $h=45$ см и $h=80$ см для дорожных конструкций с подземным коллектором (рисунок 5) и без коллектора (рисунок 6).

Из рисунков 5 и 6 видно, что характер распределения нормальных напряжений σ_x в обоих случаях абсолютно идентичен. Что касается величин нормальных напряжений σ_x , то, в случае отсутствия подземного коллектора, сжимающие напряжения σ_x вырастают до 1.0 МПа непосредственно под колесами автомобиля (рисунок 6) против 0.6 МПа в случае наличия коллектора (рисунок 5). А в зоне между колесами растягивающие напряжения σ_x достигают -0.4 МПа в случае наличия подземного коллектора (рисунок 5), в то время как они едва достигают -0.1 МПа в случае его отсутствия (рисунок 6).

Исследование закономерностей развития нормальных напряжений σ_x по глубине показало следующее:

- основные изменения нормальных напряжений σ_x происходят в пределах дорожной одежды, постепенно снижаясь до нуля в грунтовом основании дорожной одежды;
- по характеру распределения напряжений вертикальные сечения IV-IV и VI-VI взаимно идентичны. В обоих случаях растягивающие напряжения на поверхности дорожного покрытия (до -0.25 МПа) переходят в сжимающие – в срединной плоскости дорожной одежды, затем они стремятся к нулю. Только сечение VI-VI оказывается более сжатым (до +0.2 МПа);

- характер распределения нормальных напряжений σ_x в сечении V-V резко отличается от подобного характера в двух остальных сечениях тем, что здесь все наоборот (рисунок 8). Здесь в срединной плоскости дорожной одежды появляются растягивающие напряжения σ_x величиной до -0.2 МПа, а на поверхности дорожного покрытия сжимающие напряжения достигают значительных величин (+1.45 МПа). Такое поведение нормальных напряжений σ_x в сечении V-V объясняется тем, что это сечение проходит через зону сингулярности, т.е. вблизи точек приложения сосредоточенных вертикальных сил.

Следует отметить, что закономерности изменения напряжений σ_x по глубине в обоих случаях практически совпадают, и в дальнейшем приводим результаты только для конструкции с подземным коллектором.

Для более внимательного рассмотрения картины распределения σ_x в области его интенсивного изменения, т.е. в диапазоне изменения глубины от 0.05 м до 0.8 м, на рисунке 8 упомянутая область выделена пунктирными линиями, и выделенная область для конструкции с коллектором показана на отдельном рисунке 9.

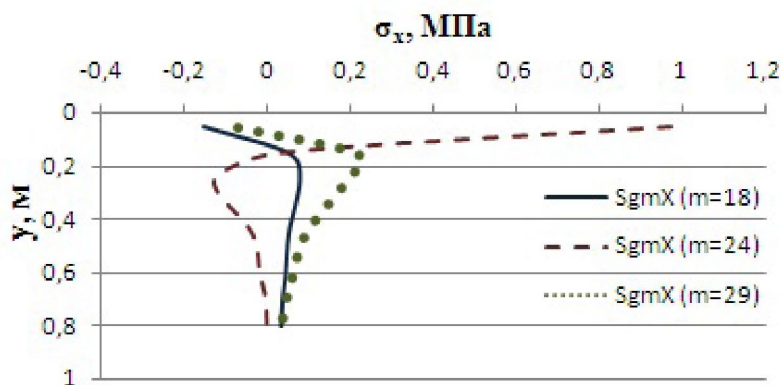


Рисунок 9 – Графики изменения по глубине нормальных напряжений σ_x в дорожной одежде конструкции с коллектором в сечениях IV-IV, V-V и VI-VI

Из всего сказанного следует, что присутствие в составе дорожной конструкции подземного железобетонного коллектора вносит существенные изменения в картину формирования напряженного состояния в ней.

Особенности формирования напряженного состояния дорожной конструкции с подземным коллектором и без него удобнее увидеть на картинах изолиний напряжений рисунка 10. Сравнение рисунков 10а и 10б позволяет убедиться в правильности вышеприведенных рассуждений. Кроме того, из них можно увидеть, что в случае наличия подземного коллектора помимо зон концентрации напряжений в точках приложения вертикальных транспортных нагрузок, в конструкции с подземным коллектором появятся еще две зоны концентрации напряжений вблизи верхних угловых точек коллекторов (рисунок 10а).

Следует отметить, что для получения целочисленных уровней на картинах изолиний рисунка 10 значения нормальных горизонтальных напряжений σ_x в МПа приведены в 100 раз увеличенном виде.

Результаты анализа нормальных вертикальных напряжений σ_y представлены на рисунках 11-17. На рисунках 11 и 12 приведены графики изменения нормальных напряжений σ_y в конструкции с коллектором и без коллектора в горизонтальных сечениях I-I, II-II и III-III, расположенных на глубинах $h=5$ см, $h=45$ см и $h=80$ см (рисунок 1). Из рисунков видно, что в этом случае картины распределения напряжений σ_y в точках дорожной одежды в обеих конструкциях практически совпадают. Небольшое отличие наблюдается лишь в области, заключенной между колесами автомобиля, когда сжимающее напряжение в срединной плоскости (глубина 45 см) в

конструкции с коллектором имеет больший градиент, чем в конструкции без коллектора. Такое заключение подтверждается и результатами рисунка 13, где графики распределения σ_y на поверхности дорожного покрытия практически сливаются.

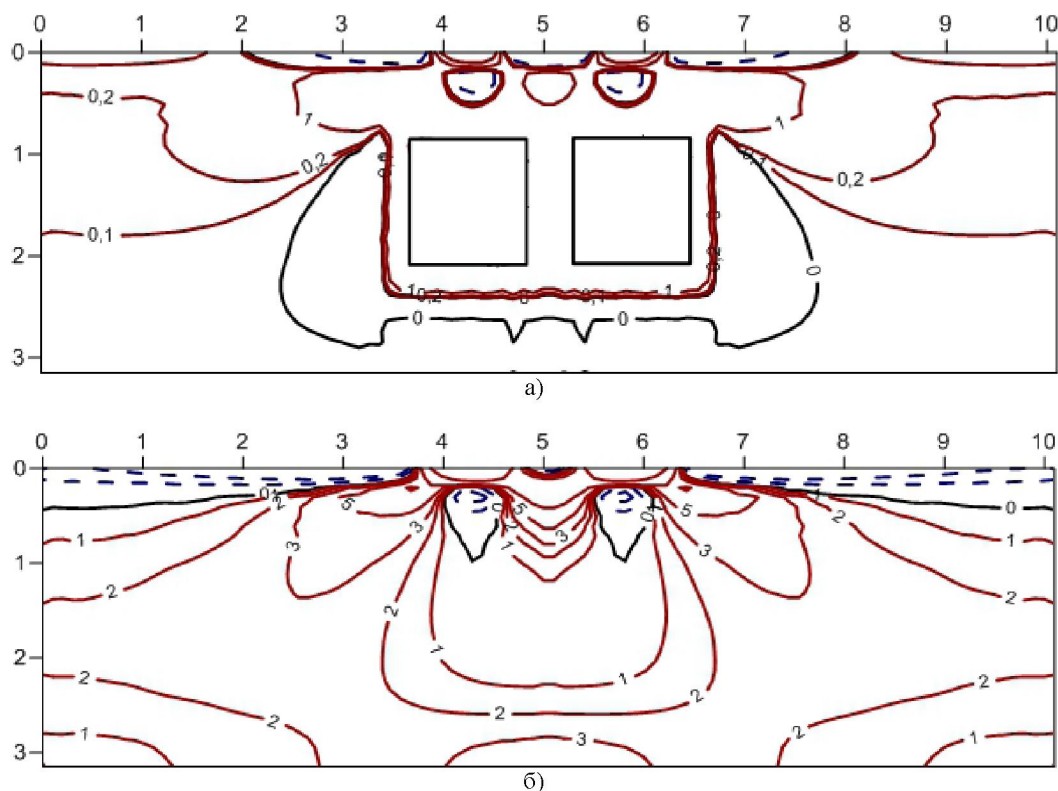


Рисунок 10 – Изолинии горизонтальных нормальных напряжений σ_x в дорожных конструкциях с подземным коллектором а) и без него б)

Совершенно другая картина наблюдается на характере распределения σ_y на глубинах, расположенных ниже коллектора (рисунки 14 и 15).

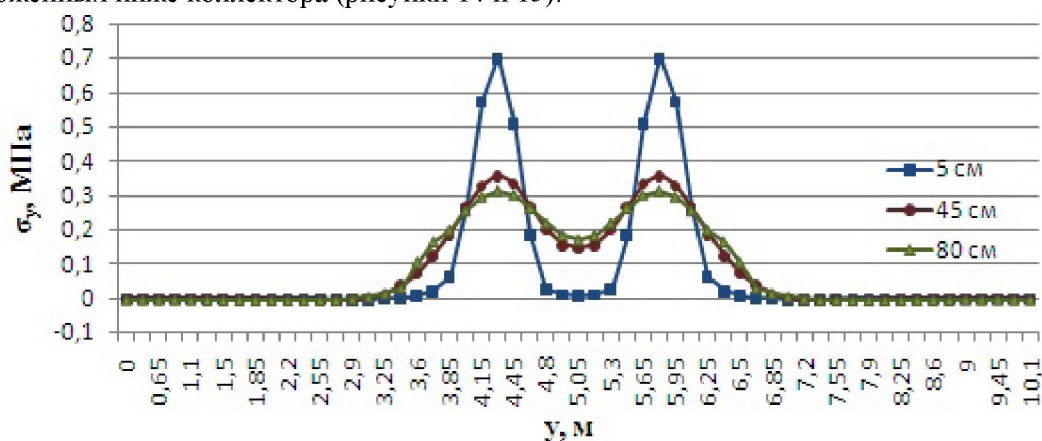


Рисунок 11 – Графики изменения нормальных напряжений σ_y в конструкции с коллектором в сечениях I-I, II-II и III-III ($h=5$ см, $h=45$ см и $h=80$ см)

Если в конструкции с коллектором в области, расположенной ниже его, графики распределения σ_y на всех вертикальных сечениях сливаются между собой и очень близки к нулю

(рисунок 15), то в конструкции без коллектора наблюдается совершенно иная картина. Здесь сжимающие напряжения σ_y растут с приближением к центру исследуемой области (рисунок 14). Причем для сечения V-V по-прежнему сохраняются аномально высокие значения напряжения σ_y .

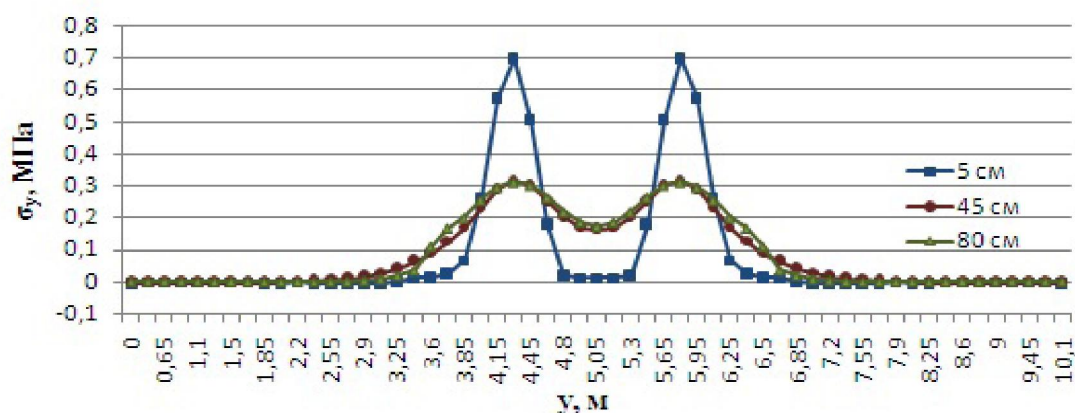


Рисунок 12 – Графики изменения нормальных напряжений σ_y в конструкции без коллектора в сечениях I-I, II-II и III-III ($h=5$ см, $h=45$ см и $h=80$ см)

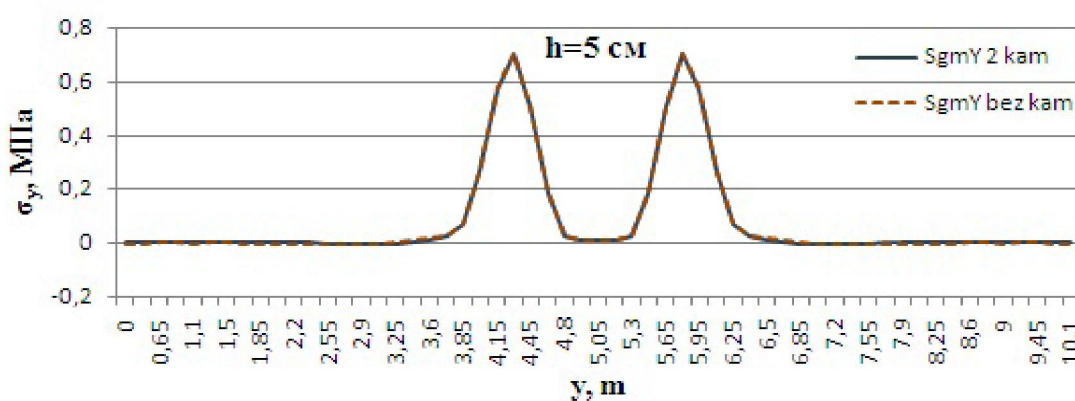


Рисунок 13 – Графики сравнения нормальных напряжений σ_y в конструкциях с коллектором и без него на поверхности покрытия ($h=0$ см)

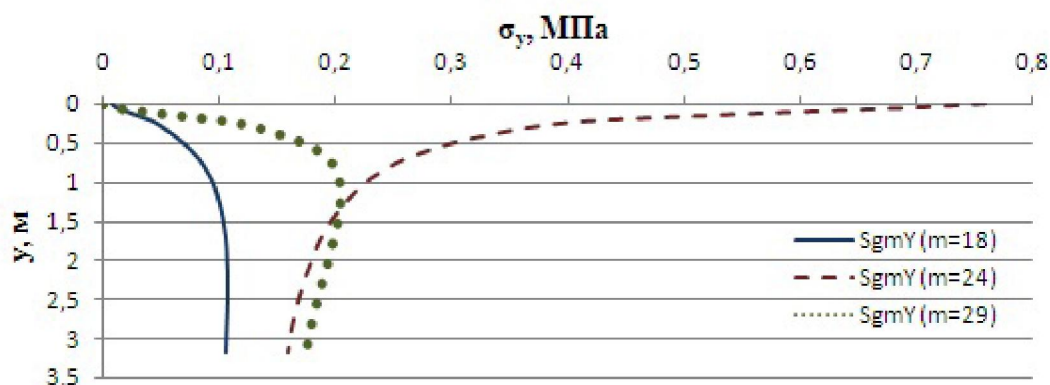


Рисунок 14 – Графики изменения нормальных напряжений σ_y в конструкции без коллектора в сечениях IV-IV, V-V и VI-VI

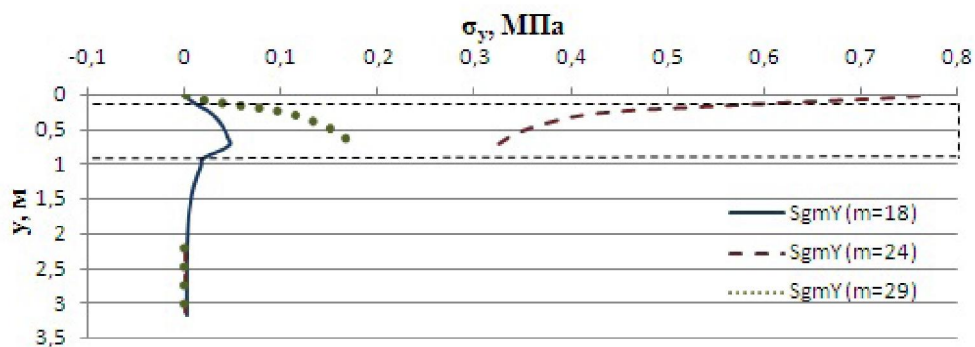


Рисунок 15 – Графики изменения нормальных напряжений σ_y в конструкции с коллектором в вертикальных сечениях IV-IV, V-V и VI-VI

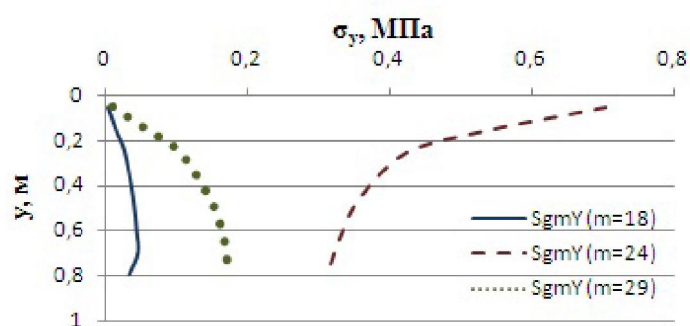


Рисунок 16 – Графики изменения нормальных напряжений σ_y в дорожной одежде в конструкции с коллектором в вертикальных сечениях IV-IV, V-V и VI-VI

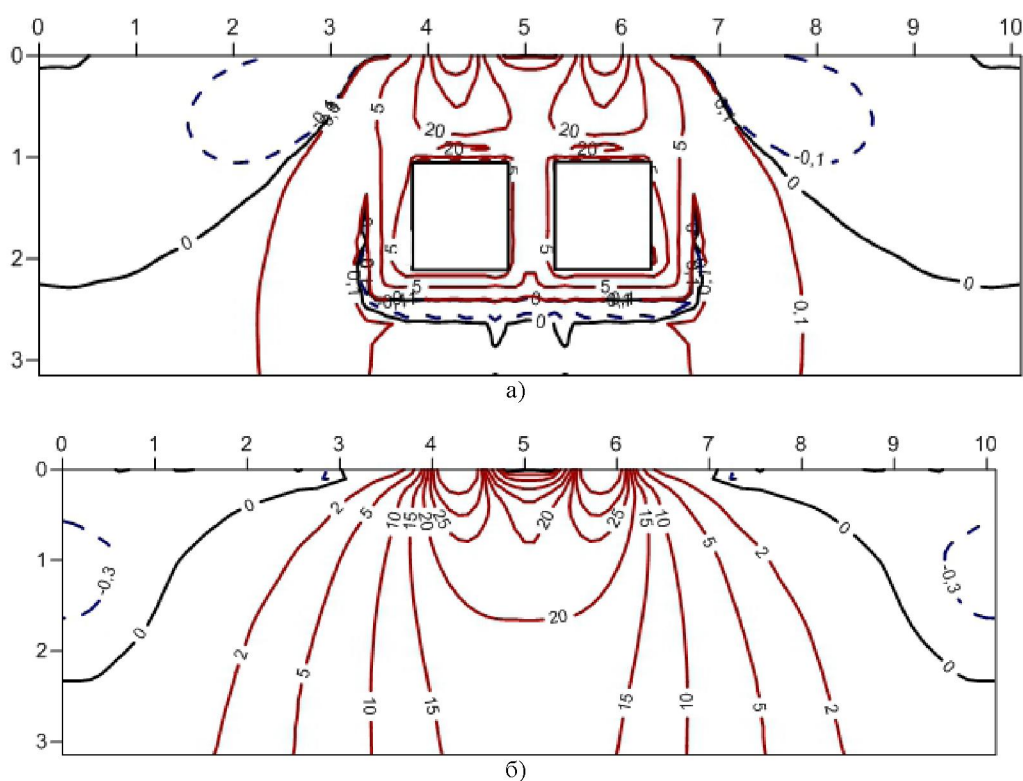


Рисунок 17 – Изолинии вертикальных нормальных напряжений σ_y в дорожных конструкциях с подземным коллектором а) и без него б)

Все вышесказанное подтверждается результатами картин изолиний нормальных вертикальных напряжений σ_y , приведенных на рисунке 17. Здесь значения σ_y также приведены в 100 кратно увеличенном виде.

Что касается закономерностей распределения касательных напряжений τ_{xy} , то влияние подземного железобетонного коллектора на распределение напряжений τ_{xy} характеризуется теми же особенностями, что и для напряжений σ_y .

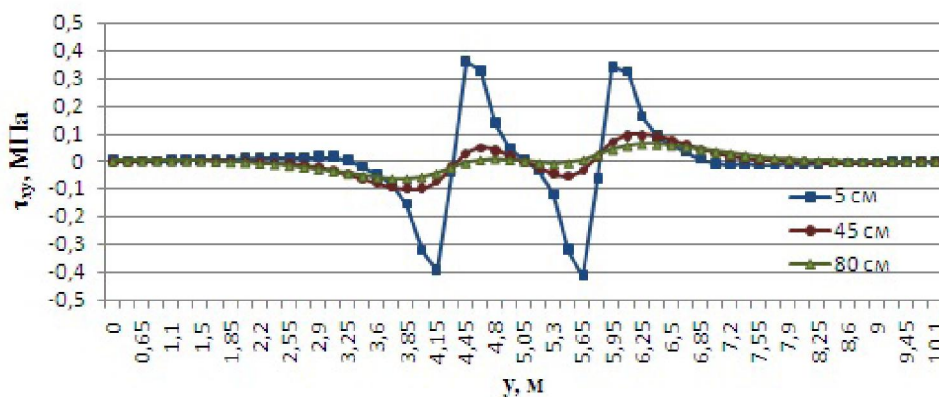


Рисунок 18 – Графики изменения касательных напряжений τ_{xy} в конструкции без коллектора в сечениях I-I, II-II и III-III ($h=5$ см, $h=45$ см и $h=80$ см)

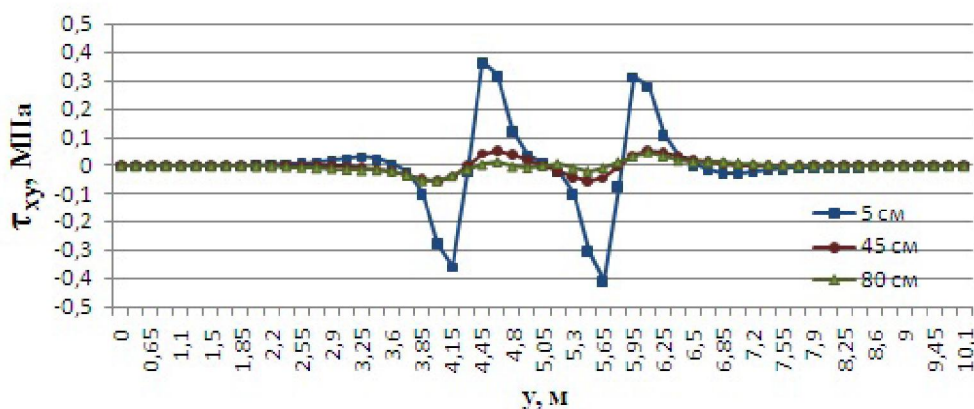


Рисунок 19 – Графики изменения касательных напряжений τ_{xy} в конструкции с коллектором в сечениях I-I, II-II и III-III ($h=5$ см, $h=45$ см и $h=80$ см)

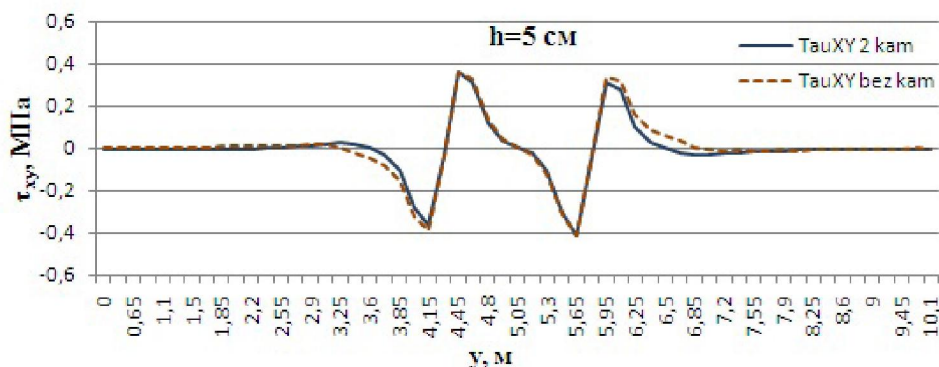


Рисунок 20 – Графики сравнения касательных напряжений τ_{xy} в конструкциях с коллектором и без него на поверхности покрытия ($h=0$ см)

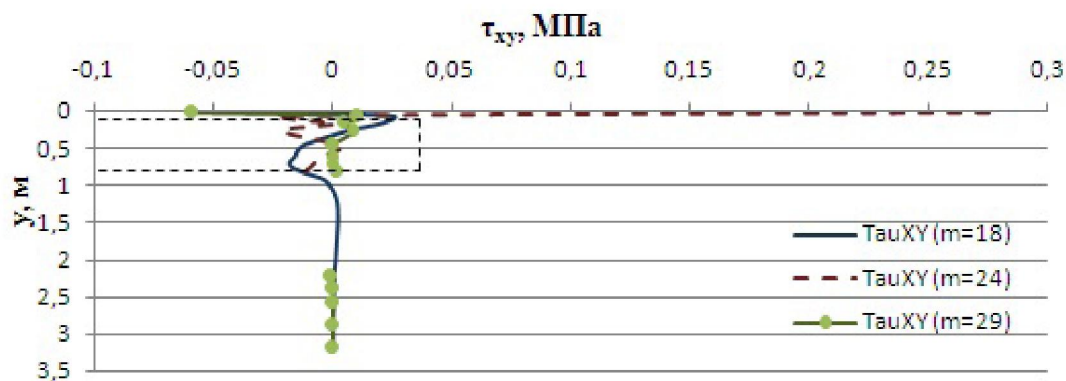


Рисунок 21 – Графики изменения касательных напряжений τ_{xy} в конструкции с коллектором в вертикальных сечениях IV-IV, V-V и VI-VI

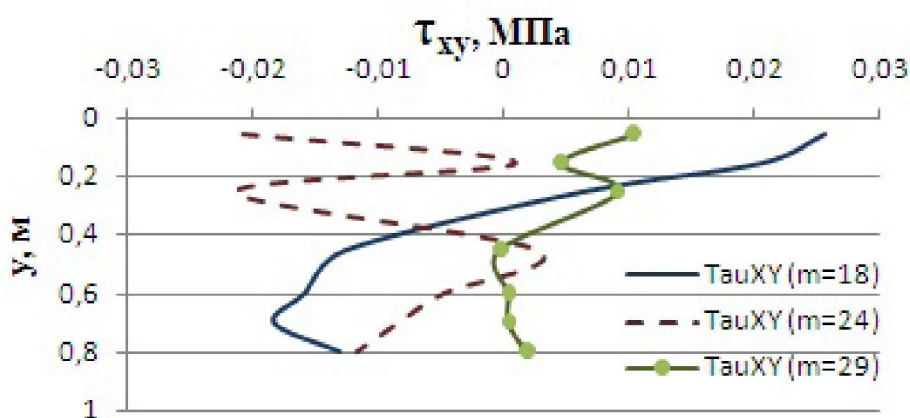


Рисунок 22 – Графики изменения касательных напряжений τ_{xy} в дорожной одежде в конструкции с коллектором в вертикальных сечениях IV-IV, V-V и VI-VI

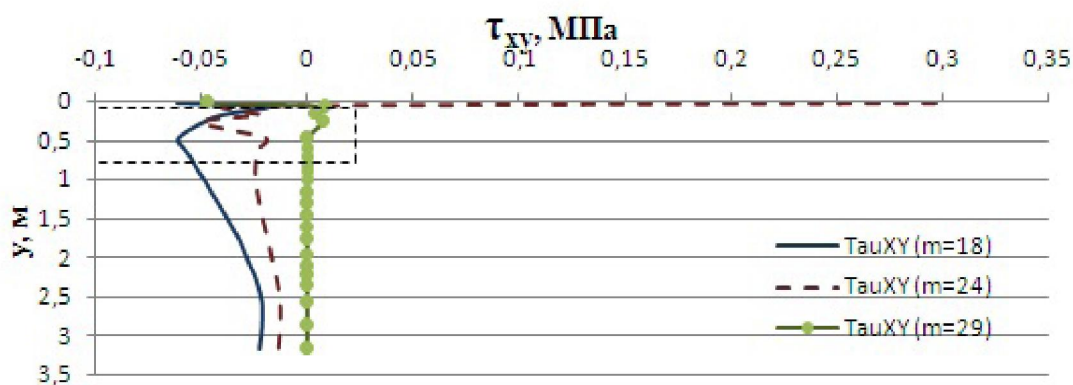


Рисунок 23 – Графики изменения касательных напряжений τ_{xy} в конструкции без коллектора в вертикальных сечениях IV-IV, V-V и VI-VI

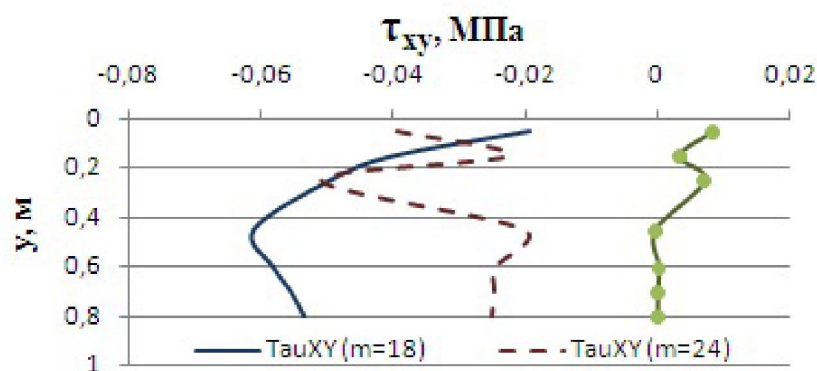


Рисунок 24 – Графики изменения касательных напряжений τ_{xy} в дорожной одежде в конструкции без коллектора в вертикальных сечениях IV-IV, V-V и VI-VI

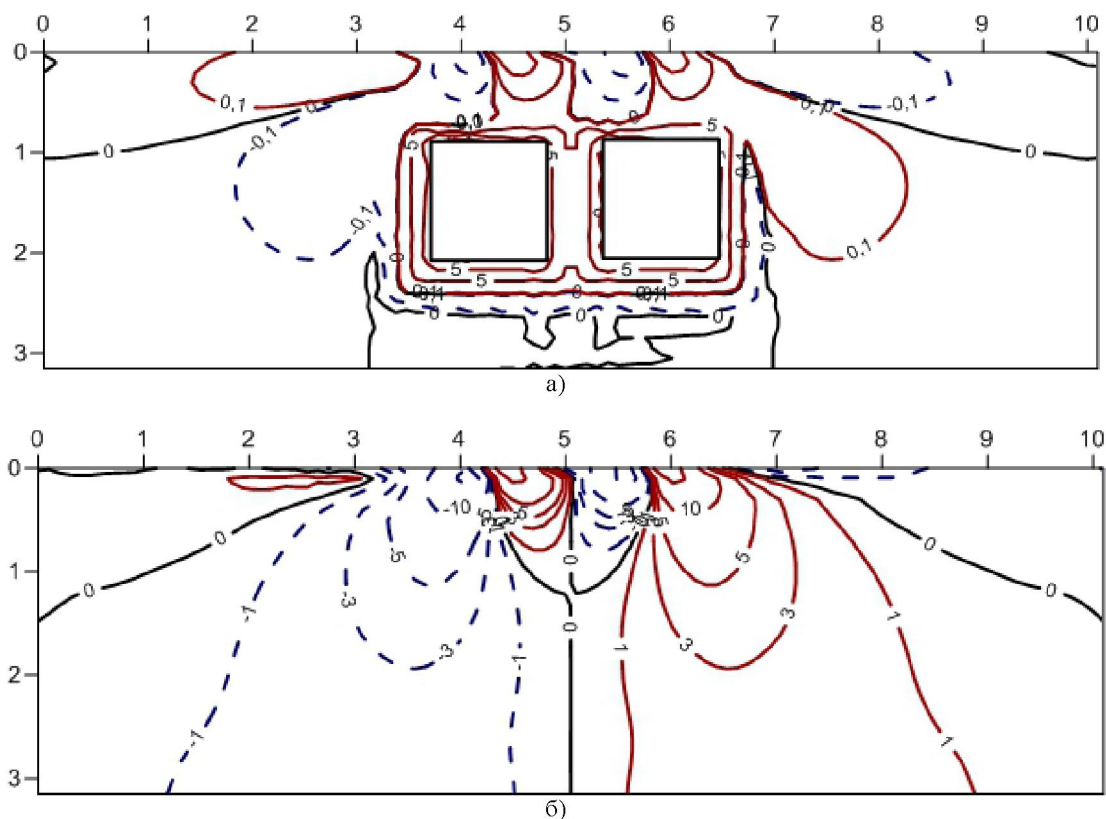


Рисунок 25 – Изолинии касательных напряжений τ_{xy} в дорожных конструкциях с подземными коллекторами а) и без них б)

Одного взгляда на картины изолиний касательных напряжений τ_{xy} достаточно (рисунок 25), что присутствие подземного железобетонного коллектора в городской дорожной конструкции резко усложняет напряженное состояние в ней.

5 Заключение

На основе полученных в настоящей работе результатов исследования можно сделать следующие выводы:

- при наличии подземного железобетонного коллектора под действием транспортной нагрузки поверхность дорожного покрытия дает меньшую осадку, чем в случае отсутствия коллектора. Такая картина деформирования объясняется уменьшением общей высоты деформируемого слоя, заключенного между жесткой поверхностью коллектора и поверхностью покрытия;

- экранирующий эффект железобетонного коллектора на картину распределения горизонтального нормального напряжения σ_x в верхней части дорожной конструкции (дорожная одежда + земляное полотно) проявляется в виде заметного уменьшения их величины (рисунок 7);

- на распределение вертикального нормального напряжения σ_y в верхней части дорожной конструкции подземный коллектор заметного влияния не оказывает;

- что касается области, расположенной непосредственно под коллектором, то здесь наблюдается обратная картина. Картины распределения горизонтального нормального напряжения σ_x в указанной области при наличии коллектора и без него практически совпадают, в то время как сильное влияние коллектора наблюдается на картине распределения вертикального нормального напряжения σ_y . Здесь жесткий железобетонный коллектор играет роль штампа и равномерно распределяет по всей своей ширине вертикальные нагрузки от автомобильных колес;

- влияние коллектора на распределение касательного напряжения τ_{xy} лучше всего проанализировать на картинах их изолиний. В верхней части дорожной конструкции особого его влияния не наблюдается. Что касается остальной части исследуемой области, наличие подземного коллектора сильно усложняет картину их распределения: вместо двух областей концентрации напряжения τ_{xy} в случае отсутствия коллектора, в данном случае наблюдается появление новых областей концентрации напряжения вблизи угловых точек коллектора.

Таким образом, выполненный в настоящей работе сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции показал, что наличие подземного коллектора оказывает существенное влияние и нельзя при расчете конструкций дорожных одежд городских дорог с подземным коллектором пользоваться методикой расчета для автомобильных дорог общего пользования.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Телтаев Б.Б., Айтбаев К.А., Джумагельдиев К.С. О взаимодействии нежесткой одежды городских дорог с элементами подземных коммуникаций /Сборник научных трудов КазАТК. "Прочность материалов и конструкций на транспорте". Алматы: КазАТК., 1996. Том III. С. 118-122.

[2] Телтаев Б.Б., Айтбаев К.А. Оценка влияния формы подземного коллектора на прочность основания автомобильных дорог /Сборник научных трудов КАСИ "Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации горных дорог". Выпуск 5. Бишкек: - КАСИ, 1997. С.81-89.

[3] Teltayev B.B., Aitbaev K.A., Idrissov D.A., Kudereev N.K. Analysis of interaction of autoroads ground basis with concrete collector/Proceeding of 4th International Congress on advances in Civil Engineering ACE 2000/Cazimagusa /Turkish Republic of northern Cyprus/1-3 November 2000.

[4] Tileu K., Teltayev B. Stress strain behavior of urban road with underground communication structure. Challenges and Innovations in Geotechnics – Zhussupbekov (Ed.). 2016. Taylor & Francis Group, London, p. 115-118.

[5] Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М: Мир, 1979. – 392 с.

[6] Тимошенко С.П., Гудьер Дж. (1975). *Теория упругости (перевод с англ.)*, Москва: Главная редакция физико-математической литературы издательства "Наука", стр. 576.

REFERENCES

[1] Teltayev B. B., Aitbayev K.A., Dzhumageldiyev K. S. On the interaction of flexible pavement for urban roads with elements of underground communications /Proceedings of KazATC. "Strength of materials and structures in transport. Almaty: KazATC, 1996. Volume III. P. 118-122. (in Russ.).

[2] Teltayev B. B., Aitbayev K. A. Evaluation of impact for underground collector shape on the strength of highway base /Proceedings KASI "Problems of design, construction and maintenance mountainous roads". Issue 5. Bishkek: KASI, 1997. P. 81-89. (in Russ.).

- [3] Teltayev B.B., Aitbayev K.A., Idrissov D.A., Kudereev N.K. Analysis of interaction of autoroads ground basis with concrete collector/Proceeding of 4th International Congress on advances in Civil Engineering ACE 2000/Cazimagusa /Turkish Republic of northern Cyprus/1-3 November 2000. (in Eng.).
- [4] Tileu K., Teltayev B. Stress strain behavior of urban road with underground communication structure. Challenges and Innovations in Geotechnics – Zhussupbekov (Ed.). 2016. Taylor & Francis Group, London, p. 115-118. (in Eng.).
- [5] Segerlind L. Application of the finite element method. – М.: Mir, 1979. – 392 p. (in Russ.).
- [6] Timoshenko S. P., Goodier J. (1975). Theory of elasticity (translated from eng.), Moscow: the Main edition of physics-mathematical literature publishing house "Nauka", p. 576. (in Russ.).

Б. Б.Телтаев¹, Қ.А.Айтбаев², С.А. Аблалиев³

^{1,2}Қазақстан жол ғылыми зерттеу институты, Нурпейсов 2А, Алматы, Қазақстан Республикасы, ³Автомобиль жолдары комитеті, Инвестициялар мен даму министрлігі, Кабанбай батыр 32/1, Астана, Қазақстан Республикасы

ЖОЛ ҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ КЕРНЕУЛІ-ДЕФОРМАЦИЯЛЫҚ КҮЙІНЕ ЖЕРАСТЫ КОЛЛЕКТОРЫНЫҢ ӘСЕРІ

Аннотация: Мақалада серпімділік теориясының көпқабатты жол құрылымына қатысты жазық есебін шектік элементтер әдісімен шешудің нәтижелері келтірілген. Жол құрылымында көлік салмағынан пайда болатын кернеулі-деформациялық күй жол жамылғысының топырақтық негізінде орналасқан жерасты темірбетон қатаң коллектордың әсерінен күрделене береді. Автомобиль жолдары құрылымдарында жерасты темірбетон коллектор болған кез бен коллектор жоқ кезде пайда болатын жылжулар векторы мен кернеулер тензорын салыстыру нәтижелері графикалық түрде берілген. Алынған нәтижелердің сараптамасы келтірілген.

Тірек сөздер: жол төсемесі, жерасты темірбетон коллектор, серпімділік теориясының жазық есебі, шектік элементтер әдісі, жылжулар, деформациялар, кернеулер.

Сведения об авторах:

Телтаев Бағдат Бурханбайұлы – доктор технических наук, профессор, президент АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт»;

Айтбаев Кобланбек Айтбаевич - кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт»;

Аблалиев Сатжан Айтенович - кандидат технических наук, заместитель председателя Комитета автомобильных дорог Министерства по инвестициям и развитию Республики Казахстан.