

## НАГРУЗОЧНЫЕ РЕЖИМЫ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ НЕЖЕСТКОГО ТИПА

**Богомолов В.А.**

**Жданюк В.К.**

**Богомолов С.В.**

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

---

В соответствии с [1] в качестве внешней нагрузки на дорожную одежду при ее расчете на прочность принимается круглое пятно контакта с равномерно распределенной нагрузкой и коэффициентом, учитывающим динамику нагружения  $K_0 = 1,26...1,32$ .

В работе [2] отмечается, что одним из основных недостатков такого подхода является то, что не в полной мере учитывается взаимовлияние рядом расположенных автомобилей и колес. Кроме того, в [1] не учитываются силы трения в пятне контакта колеса с покрытием [2], которые приводят к существенному изменению как качественной, так и количественной картины 3-D напряженно-деформированного состояния дорожной одежды, (рис. 4).

Из сравнения рис. 4а и рис. 4б можно сделать следующие выводы:

1. По характеру напряженно-деформированного состояния дорожной одежды с нагрузкой без сил трения в пятне контакта нельзя судить о предельном состоянии слоев дорожной одежды, нагруженных при торможении или разгоне автотранспортного средства с максимальным замедлением-ускорением, т.е., при максимальной одноразовой нагрузке на покрытие дорожной одежды.
2. Прочностной расчет дорожной одежды на максимальную одноразовую нагрузку на первом этапе необходимо внедрять как дополнение к [1].
3. Необходимо учитывать тот факт, что автомобиль подавляющее количество времени движется в тяговом режиме, и на ведущих колесах практически постоянно присутствует тяговое усилие. В дальнейшем такой режим нагружения (с силами трения в пятне контакта) необходимо внедрять и в расчеты на долговечность дорожной одежды.
4. Для проведения расчетов по п. 2 необходимо определиться с величиной максимальных нагрузочных режимов.

Анализ, проведенный в ХНАДУ, показал, что для решения вопроса по п. 4 прежде всего необходимо проанализировать три схемы торможения и разгона автотранспортных средств (АТС):

- одиночного грузового автомобиля;
- седельного тягача с полуприцепом;
- трехосного сочлененного автобуса.

## Одиночный грузовой автомобиль

Схема действия сил в процессе торможения такого АТС представлена на рис. 1, [3]:

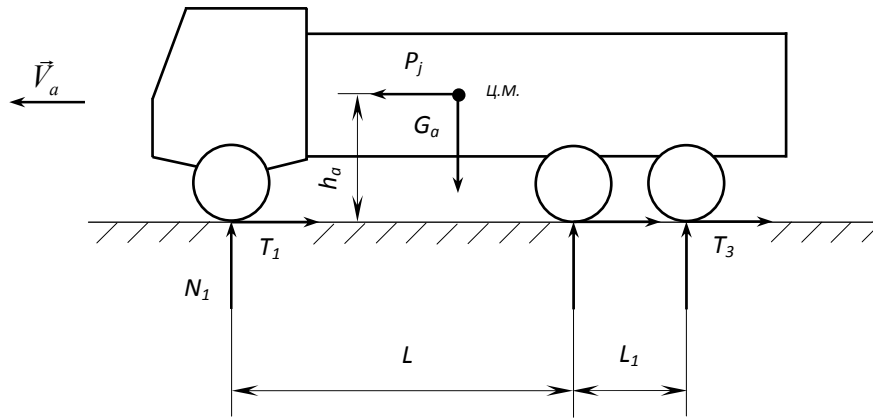


Рис. 1. Расчетная схема действующих сил при торможении трехосного грузового автомобиля с задней балансирной тележкой

Минуся промежуточные вычисления, с учетом рекомендаций [3, 4], для тормозящего автомобиля можно записать:

$$N_1 = P_1 + \Delta N_1; \quad N_2 \cong N_3 = P_2 - \Delta N_2, \quad (1)$$

где  $N_i$  – нормальная реакция дорожной одежды на  $i$ -ю ось автомобиля;

$P_i$  – нормальная реакция дорожной одежды в статике;

$\Delta N_i$  – динамическая составляющая.

$$\Delta N_1 = \frac{h_a \cdot Z_T}{(L + L_1/2)} G_a; \quad \Delta N_2 = \Delta N_3 = \frac{h_a \cdot Z_T}{2(L + L_1/2)} G_a \quad (2)$$

где  $Z_T = \frac{j_a}{g}$  – коэффициент торможения;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$ .

Из [5, 6, 7] для рис. 1 можно принять:

$$P_1 = 68,6 \text{ кН}; \quad P_2 = P_3 = 115 \text{ кН}; \quad \frac{h_a}{(L + L_{1/2})} = 0,4. \quad (3)$$

Исходя из требований [4, 8, 9], можно принять:

$$j_a = 5,5 \text{ м/с}^2; \quad Z_T = 0,56. \quad (4)$$

С учетом [3] можно допустить:

$$T_i = Z_T \cdot N_i. \quad (5)$$

Тогда в качестве расчетных нагрузок, для торможения по рис. 1 получаем:

$$N_1 = 135 \text{ кН}; \quad T_1 = 75,6 \text{ кН}; \quad N_2 = N_3 = 81,8 \text{ кН}; \quad T_2 = T_3 = 45,8 \text{ кН}. \quad (6)$$

При разгоне автомобиля из [10] можно принять:

$$j_{ap} = -2 \frac{M}{c^2}, \quad (7)$$

тогда:

$$Z_p = -0,204. \quad (8)$$

Подставляя в (2)  $Z_p$  вместо  $Z_T$ , по (1) можно определить  $N_i$  при разгоне.

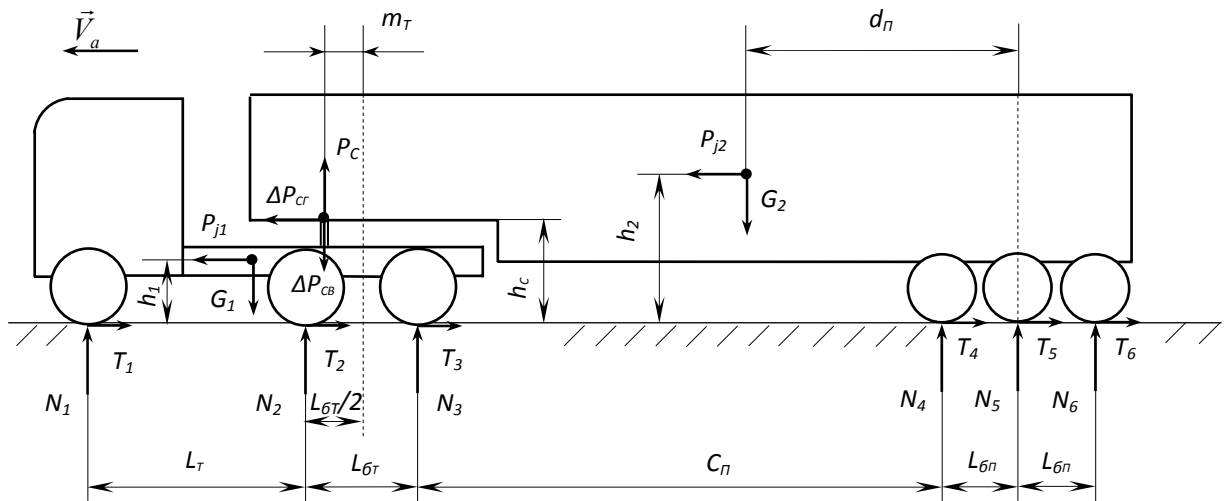
И, если считать, что ведущие мосты у АТС - 2-ой и 3-ий, то:

$$T_1 = 0; \quad T_2 = T_3 = \frac{(P_1 + P_2 + P_3)Z_T}{2}. \quad (9)$$

Таким образом, для разгона автомобиля получаем:

$$N_1 = 44,4 \text{ кН}; \quad T_1 = 0; \quad N_2 = N_3 = 127,1 \text{ кН}; \quad T_2 = T_3 = -30,5 \text{ кН}. \quad (10)$$

### Седельный тягач с полуприцепом



$P_c$  – сила, действующая в седельном устройстве в статике на полуприцеп;  
 $\Delta P_{CB}, \Delta P_{CR}$  – дополнительные вертикальная и горизонтальная силы, действующие при торможении на тягач

Рис. 2. Расчетная схема сил, действующих при торможении автопоезда с седельным тягачом

В соответствии с рекомендациями [4] можно принять, что для тягача справедливы выражения (1), а для полуприцепа:

$$N_{iII} = \frac{\sum N_{iIII}}{n_{II}}; \quad \sum N_{iIII} = N_4 + N_5 + N_6, \quad (11)$$

где  $n_{II}$  – количество осей прицепа.

$$\Delta N_1 = \frac{P_{j1} h_1 + \Delta P_{CT} \cdot hc + \Delta P_{CB} \cdot m_T}{L_T^*}; \quad \Delta N_2^* = \Delta P_{CB} - \Delta N_1, \quad (12)$$

где  $\Delta N_2^* = N_2 + N_3$ ;  $P_{j1} = G_1 \cdot Z$ ;  $G_1 = \sum P_{iT} + \sum P_{iII} - G_2$ ;

$$\sum P_{iT} = P_1 + P_2 + P_3; \quad \sum P_{iII} = P_4 + P_5 + P_6; \quad G_2 = \frac{\sum P_{iII} \cdot L_P}{L_P - d_{II}};$$

$$L_P = m_T + \frac{L_{\delta T}}{2}(n_T - 1) + C_{II} + \frac{L_{\delta II}}{2}(n_{II} - 1); \quad (13)$$

$$d_P = \frac{L_P}{1 + \frac{\sum P_{iII}}{P_C}}; \quad L_T^* = L_T + \frac{L_{\delta T}}{2}(n_T - 1); \quad \Delta P_{CT} = P_{j2} - \sum T_{iII};$$

$$P_{j2} = G_2 \cdot Z; \quad \sum T_{iII} = T_4 + T_5 + T_6 = \sum N_{iII} \cdot Z_T; \quad \Delta P_{CB} = \frac{P_{j2} \cdot h_2 - \Delta P_{CT} \cdot h_1}{L_P};$$

$$\sum N_{iII} = \frac{G_2(L_P - d_{II}) - P_{j2}(h_2 - h_C)}{L_P + Z_T h_C}; \quad \Delta N_2 = \Delta N_3 = \frac{\Delta N_2^*}{n_T};$$

где  $n_T$  – количество задних ведущих осей тягача.

Из [5, 6, 7] в качестве расчетных величин можно допустить:

$$P_1 = 71,5 \text{ кН}; \quad P_2 = P_3 = 115 \text{ кН}; \quad P_4 = P_5 = P_6 = 98,0 \text{ кН}; \quad (14)$$

$$L_T = 3,2 \text{ м}; \quad L_{\delta T} = 1,4 \text{ м}; \quad C_{II} = 3,925 \text{ м}; \quad L_{\delta II} = 1,37 \text{ м}; \quad h_C = 1,38 \text{ м}; \quad m_T = 0,31 \text{ м};$$

$$h_1 = 0,8 \text{ м}; \quad h_2 = 1,7 \text{ м}; \quad P_C = 16,7 \text{ кН}; \quad n_T = 2 \text{ м}; \quad n_{II} = 3;$$

При условии (4) получаем следующий нагрузочный режим:

$$N_1 = 132,2 \text{ кН}; \quad T_1 = 74 \text{ кН}; \quad N_2 = N_3 = 106,6 \text{ кН}; \quad T_2 = T_3 = 59,7 \text{ кН}; \quad (15)$$

$$N_4 = N_5 = N_6 = 83,4 \text{ кН}; \quad T_4 = T_5 = T_6 = 46,7 \text{ кН};$$

При разгоне автомобиля, принимая (7, 8) и считая, что:

$$\sum N_{iII} = \frac{G_2(L_P - d_{II}) - P_j(h_2 - h_C)}{L_P}, \quad (16)$$

получаем:

$$N_1 = 32,3 \text{ кН}; \quad T_1 = 0 \text{ кН}; \quad N_2 = N_3 = 132,3 \text{ кН}; \quad T_2 = T_3 = -60,7 \text{ кН}; \quad (17)$$

$$N_4 = N_5 = N_6 = 99,6 \text{ кН}; \quad T_4 = T_5 = T_6 = 0 \text{ кН}.$$

### Трехосный сочлененный автобус

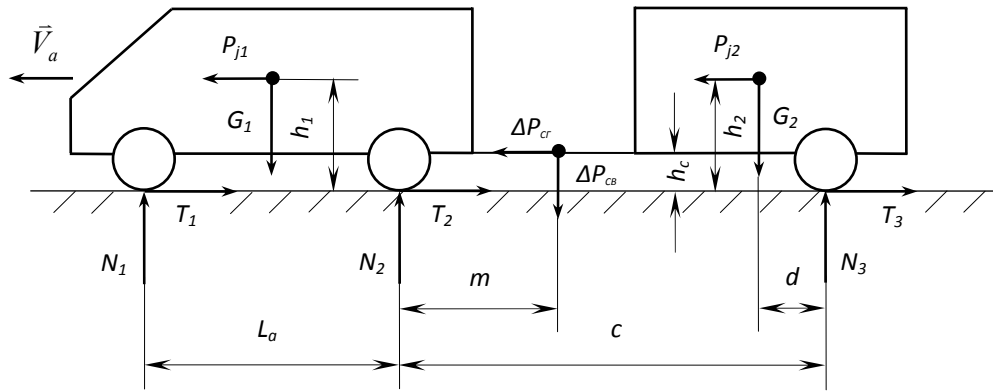


Рис. 3. Расчетная схема сил при торможении сочлененного автобуса

Анализ показывает, что для рис. 3 также справедливы соотношения (1).

При этом, при торможении:

$$\begin{aligned} \Delta N_1 &= \frac{P_{j1}h_1 + \Delta P_{cr} \cdot hc - \Delta P_{CB} \cdot m}{L_a}; \quad \Delta N_2 = P_{CB} - \Delta N_1; \\ G_1 &= P_1 + P_2 + P_3 - G_2; \quad G_2 = \frac{P_3(c-m)}{c-m-d}; \quad P_{j1} = G_1 \cdot Z_T; \\ P_{j2} &= G_2 \cdot Z_T; \quad P_{j1} = G_1 \cdot Z_T; \quad \Delta P_{cr} = P_{j2} - T_3; \\ \Delta P_{CB} &= \frac{P_{j2}h_2 - \Delta P_{cr}hc}{c-m}; \quad N_3 = \frac{G_2(c-m-d) - P_{j2}(h_2 - hc)}{c-m + hc \cdot Z_T}; \\ T_3 &= N_3 \cdot Z_T. \end{aligned} \quad (18)$$

Из [3, 6, 11] можно принять:

$$\begin{aligned} P_1 &= 69,6 \text{ кН}; \quad P_2 = 110,7 \text{ кН}; \quad P_3 = 93,1 \text{ кН}; \quad L_a = 6 \text{ м}; \quad c = 6,39 \text{ м}; \\ m &= 2,18 \text{ м}; \quad h_1 = 1,37 \text{ м}; \quad h_2 = 1,37 \text{ м}; \quad h_c = 0,5 \text{ м}; \quad d = 0,34 \text{ м}. \end{aligned} \quad (19)$$

Тогда [4, 8, 9] при:

$$j_a = 6 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; \quad Z_T = 0,61, \quad (20)$$

получаем:

$$\begin{aligned} N_1 &= 88,3 \text{ кН}; \quad T_1 = 53,9 \text{ кН}; \quad N_2 = 110,2 \text{ кН}; \quad T_2 = 67,2 \text{ кН}; \\ N_3 &= 74,9 \text{ кН}; \quad T_3 = 45,7 \text{ кН}. \end{aligned} \quad (21)$$

В случае разгона, если принять что [10]:

$$j_p = -2,3 \frac{M}{c^2}; \quad Z_p = -0,235, \quad (22)$$

и считать, что:

$$N_3 = \frac{G_2(c - m + d) - P_{j2}(h_2 - h_c)}{c - m}, \quad (23)$$

то:

$$N_1 = 60,2 \text{ кН}; \quad T_1 = 0 \text{ кН}; \quad N_2 = 115,3 \text{ кН}; \quad T_2 = 64,3 \text{ кН}; \quad N_3 = 98,0 \text{ кН}; \quad T_3 = 0 \text{ кН}.$$

Из (6, 10, 15, 17, 21, 23) затруднительно утверждать какой из режимов движения является наиболее опасным для дорожной одежды.

Необходим комплексный показатель, характеризующий трехмерное напряженно-деформированное состояние дороги.

Назовем его показателем нагруженности дорожной одежды. Исходя из выводов работы [12], его можно принять в виде модифицированного критерия прочности Г.С. Писаренко, А.А. Лебедева [12, 13].

$$P_H = \max [\chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_1 A^{1-J} - [\sigma_+]] \leq 0, \quad (24)$$

где  $J = \frac{\sigma_i}{\sigma_0}; \quad \sigma_0 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3; \quad \chi = \frac{[\sigma_+]}{[\sigma_-]},$

$A$  – константы для данного материала;

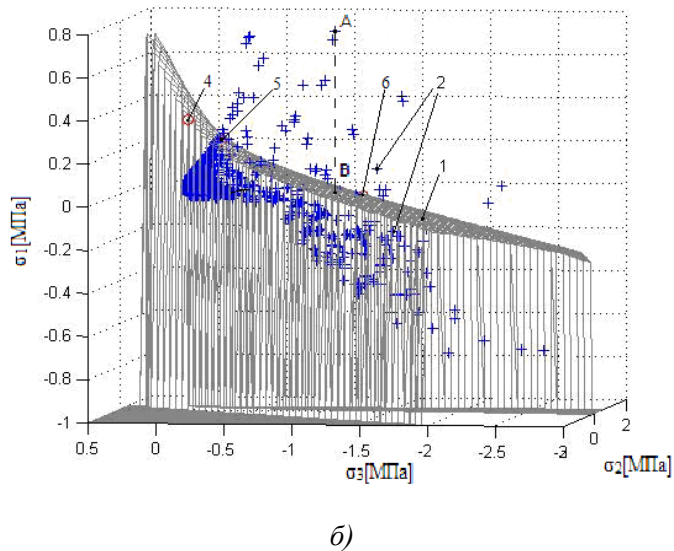
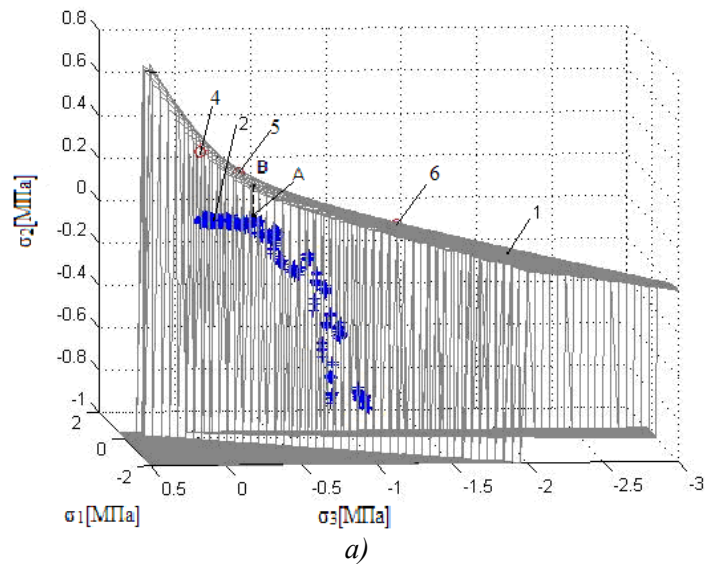
$[\sigma_+]$  и  $[\sigma_-]$  – допускаемые напряжения на растяжение и сжатие;

$\sigma_i$  – интенсивность напряжения;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения в точке.

Физический смысл этого критерия становится понятным из рассмотрения рис. 4. Для всех точек напряженно-деформированного состояния рассчитывается критерий (24) и берется максимальное значение. Если оно отрицательное или равно нулю (см. рис. 4 а), то все точки лежат ниже предельной поверхности или на ней. В противном случае (рис. 4 б), условие прочности не выполняется.

На рис. 4 представлено нагружение по кругу [1] верхнего слоя пятислойной дорожной одежды с упругими и геометрическими характеристиками по примеру 1 Приложения Л [1].



а) нормальная нагрузка ( $P = 0,8$  МПа) без сил трения; б) с силами трения в пятне контакта;

1 – предельная поверхность по модифицированному закону Г.С. Писаренко – А.А. Лебедева;  
 2 – точки напряженно-деформированного состояния; 3 – точка, соответствующая значению  $R_c = 1,3$  МПа; 4 - точка, соответствующая значению  $R_p = 0,35$  МПа;  
 5 – точка, соответствующая значению  $R_\tau = 0,25$  МПа; А – точки напряженно-деформированного состояния, соответствующие (24); В – проекция точки А на предельную поверхность для рис. 4 а –  $P_H = -0,202$  МПа; рис. 4 б –  $P_H = 0,98$  МПа.

Рис. 4. Точки напряженно-деформированного состояния верхнего слоя пятислойной дорожной одежды

Очевидно, чем выше  $P_H$ , тем выше уровень напряженно-деформированного состояния дорожной одежды.

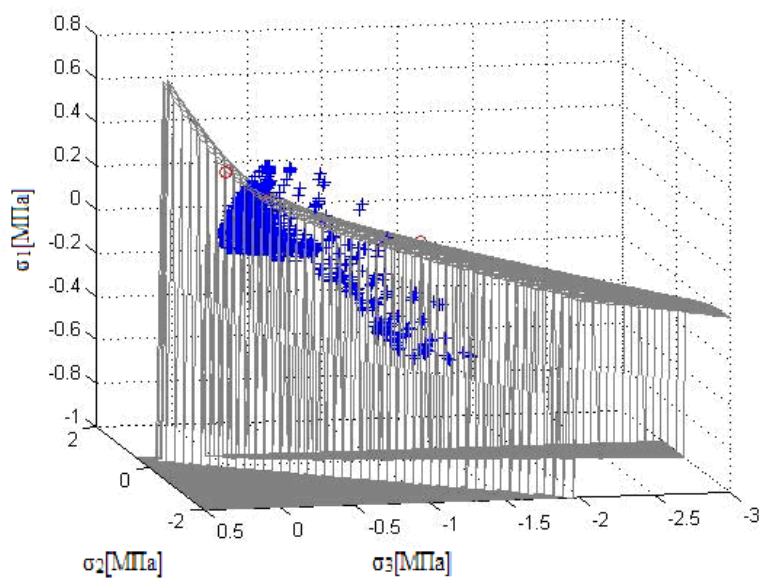
Для рассматриваемых на рис. 1-3 случаев нагружения, результаты расчетов по (24), с принятыми на рис. 4  $R_C, R_P, R_T$  приведены в табл. 1.

**Таблица 1** – Значения показателя нагруженности дорожной одежды

№ п/п	Транспортное средство	Показатель нагруженности дорожной одежды $R_H, \text{МПа}$
1	Сочлененный автобус, тормозящий с замедлением $6 \text{ м/с}^2$	0,048
2	Тоже, разгоняющийся с ускорением $2,3 \text{ м/с}^2$	0,038
3	Седельный тягач с полуприцепом, тормозящий с замедлением $5,5 \text{ м/с}^2$	0,225
4	Тоже, разгоняющийся с ускорением $2 \text{ м/с}^2$	0,173
5	Трехосный самосвал, тормозящий с замедлением $5,5 \text{ м/с}^2$	0,238
6	Тоже, разгоняющийся с ускорением $2 \text{ м/с}^2$	0,119

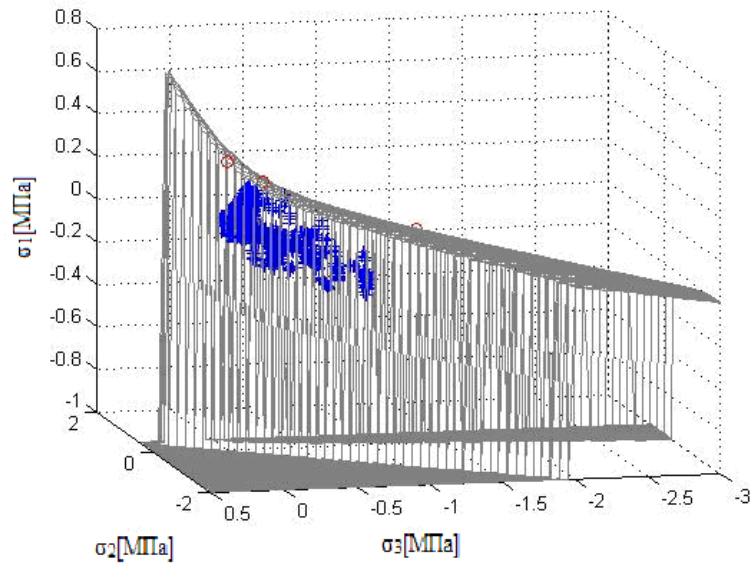
Как видно из таблицы 1, наибольшее значение показателя нагруженности дорожной одежды достигается при торможении седельного тягача с полуприцепом и трехосного самосвала.

На рис. 5 представлены расчеты напряженно-деформированного состояния трех верхних слоев дорожной одежды с параметрами по рис. 4 и с нагружением от тормозящего трехосного самосвала.



a)





б)

а) от балансирной тележки; б) от передней оси; обозначения всех точек см. рис. 4.

Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние дорожной одежды с нагрузкой от тормозящего трехосного самосвала

Из рис. 5 видно, что наибольшая нагрузка на дорожную одежду передается от тормозящей передней оси самосвала.

Рассуждая аналогичным образом, в таблице 2 приведем рекомендуемые наружные режимы в пятне контакта шин с дорожной одеждой для I-III категорий дорог.

Таблица 2 – Рекомендуемые максимальные нагрузочные режимы на дорожную одежду

Показатель	Категория дороги		
	I $P_{C0}^* = 115 \text{ kH}$	II $P_{C0}^* = 100 \text{ kH}$	III $P_{C0}^* = 60 \text{ kH}$
Вертикальная нагрузка на ось $N_1, \text{ kH}$	135	127,6	78
Горизонтальная нагрузка $T_1, \text{ kH}$	75,6	71,5	43,6
Автомобиль – аналог, параметры которого приняты в расчетах	МАЗ – 6501А5-320-001 (самосвал)	КаМАЗ – 6520-19 (самосвал)	КаМАЗ – 43114 (грузовая – бортовая)

\* Допустимая нагрузка на ось – согласно [1].

## Выводы

1. Используемые в ВБН В.2.3-218-186-2004 «Споруди транспорту: Дорожній одяг нежорсткого типу» нагрузочные режимы ни качественно, ни количественно не отображают реальную максимальную расчетную нагрузку на дорожную одежду.
2. В качестве максимальной нагрузки можно принять тормозящий с нормативной эффективностью автомобиль (автопоезд). При этом максимально нагруженным является передний мост.
3. Предложенный «показатель» нагруженности дорожной одежды  $P_H$  может быть использован при выборе наибольшей расчетной нагрузки на дорожную одежду.

## Литература

1. Споруди транспорту: Дорожній одяг нежорсткого типу: ВБН В.2.3-218-186-2004. – Офіц. вид. – К.: Укравтодор, 2004. – 176 с.
2. Богомолов В.О. Щодо необхідності розробки нової методики розрахунку напружено-деформованого стану дорожнього одягу / В.О. Богомолов, В.К. Жданюк, С.В. Богомолов // Автошляховик України. – 2011. № 1. – С. 23-26.
3. Туренко А.Н. Совершенствование способов регулирования выходных параметров тормозной системы автотранспортных средств / Туренко А.Н., Богомолов В.А., Клименко В.И., Кирчатый В.И., Ходырев С.Я. – Харьков: Издательство ХНАДУ (ХАДИ), 2002. – 400 с.
4. Правила ЕЭК ООН № 13 (09). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств категорий *M*, *N* и *O* в отношении торможения. – Офіц. изд. – Минск: 2006, – 311 с. – (Международные правила).
5. Пойченко В.В. Современные грузовые автотранспортные средства. Справочник / Пойченко В.В., Кондрашов П.В., Потемки С.В., Мазуров В.А. – М.: «Агентство Доринформсервис», 1997 г. – 544 с.
6. Краткий автомобильный справочник / [Понизовкин А.Н., Власенко Ю.М., Ляликов М.Б. и др.]. – М.: АО «Трансконсалтинг», НИИАТ, 1994. – 779 с.
7. Туренко А.М. Функціональний розрахунок гальмівної системи автомобіля з барабанными гальмами та регулятором гальмівних сил / [Туренко А.М., Богомолов В.О., Клименко В.І. та ін.]. – Харків: ХНАДУ, 2003. – 120 с.
8. Засоби транспортні дорожні. Експлуатаційні вимоги безпеки до технічного стану та методи контролю: ДСТУ 3649-97. - [Чинний від 1997-09-29]. – К.: Держстандарт України, 1998. – 20 с. – (Державний стандарт України).
9. Тормозные системы и тормозные свойства автотранспортных средств / Нормативы эффективности: ГОСТ 22895-77. – М.: Издательство стандартов, 1993. – 21 с.
10. Вахламов В.К. Автомобили. Эксплуатационные свойства. Учебник / В.К. Вахламов – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 240 с.
11. Краткий автомобильный справочник. Том 1. Автобусы / [Кисуленко Б.В., Венгеров И.А., Дементьев Ю.В. и др.]. – М.: МПСТ «Трансконсалтинг», 2002. – 360 с.
12. Лебедев А.А. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии: Справочник / [Лебедев А.А., Ковальчук Б.И., Гишняк Ф.Ф., Мамашевский В.П.]. – К.: Наукова думка, 1983. – 366 с.