

## ОТЧЕТ

по теме:

**Расчет значений допустимой толщины дорожной одежды над  
плитами XPS ТЕХНОНИКОЛЬ.**

Договор № ГПХ ФЛ - ТНСС/77

Исполнители:



Е.С. Пшеничникова, к.т.н



И.Ж.Хусаинов, к.т.н

Москва 2018

## РЕФЕРАТ

Объем работы 15 стр., в том числе 2 табл.

Разработаны методы расчета значений допустимой толщины железобетонной плиты над плитами XPS ТЕХНОНИКОЛЬ исходя из обеспечения прочности плит XPS ТЕХНОНИКОЛЬ. На основе выполненных расчетов составлены таблицы для практического применения. Приведен пример расчета.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ПРОВЕРКА ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ НА ПРОЧНОСТЬ.....	5
2 РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛИТЕХPS ТЕХНОНИКОЛЬ, РАСПОЛОЖЕННОЙ ПОД ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТОЙ.....	7
3 ПРИМЕР РАСЧЕТА .....	11
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	13
ЛИТЕРАТУРА.....	15

## ВВЕДЕНИЕ

Для работы плит XPS ТЕХНОНИКОЛЬ, расположенных под железобетонными плитами в дорожной конструкции, без возникновения в них (плитах XPS ТЕХНОНИКОЛЬ) деформаций, требуется обеспечение такой толщины железобетонной плиты, при которой напряжения от транспортной нагрузки не превысят прочность плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ на сжатие.

В настоящей работе приведен расчет минимальной допустимой толщины железобетонной плиты, уложенной над плитой XPS ТЕХНОНИКОЛЬ. При этом расчет может выполняться для двух вариантов слоистых оснований железобетонных плит:

- на грунтовом основании уложены плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ с подстилающим и защитным слоями из песка. Железобетонная плита укладывается на защитный слой;
- на грунтовом основании уложены плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ с подстилающим слоем из песка. Железобетонная плита укладывается непосредственно на плиту XPS ТЕХНОНИКОЛЬ.

Для расчетов по второму варианту разработана программа. Для удобства пользователей разработаны две таблицы значений допустимых значений толщин железобетонных плит для различных нагрузок. Рассмотрены два варианта колес автомобилей: спаренное и одиночное.

## 1 ПРОВЕРКА ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ НА ПРОЧНОСТЬ.

Поставленная задача формулируется как определение минимальной допустимой толщины железобетонной плиты, уложенной на плиту XPS ТЕХНОНИКОЛЬ исходя из сохранения прочности плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ под нагрузкой от колеса автомобиля (или какой-либо другой нагрузкой). Возникающие в плите XPS ТЕХНОНИКОЛЬ нормальные напряжения должны быть меньше предельных значений, определяемых лабораторным путем и входящих в его технические характеристики.

При этом принимается, что прочность железобетонной плиты на изгиб обеспечена. Расчет железобетонной плиты на прочность выполняется в соответствии с [2].

Однако если железобетонные плиты имеют небольшие размеры и при этом швы между плитами не омоноличены, т.е. нагрузка от колеса автомобиля не передается на соседнюю плиту, железобетонная плита вследствие деформируемости слоев дорожной одежды под ней изгибается.

При этом кроме вертикальных напряжений, возникают и растягивающие напряжения, которые должны быть меньше допустимых при изгибе.

Оценим величину растягивающих напряжений в железобетонной плите.

Описывая деформационные свойства подстилающего слоя коэффициентом постели  $k_n$ , деформационные свойства железобетонной плиты модулем упругости  $E_b$ , коэффициентом Пуассона  $\mu_b$  и принимая бетонную плиту за балочную [4], определим возникающие в плите сжимающие и растягивающие напряжения. Ширину плиты обозначим через  $B$ , толщину через  $H$ , момент инерции через  $J_b$ , длину плиты через  $l$ , цилиндрическую жесткость через  $D$ :

$$J_b = \frac{BH^3}{12} \quad (1.1)$$

$$D = \frac{E_b J_b}{(1 - \mu_b^2)} \quad (1.2)$$

Коэффициент жесткости  $\alpha$  равен:

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{k_{пB}}{4D}} \quad (1.3)$$

Если выполняется условие (1.4), то железобетонную плиту следует рассматривать как жесткую и расчет на изгиб не требуется [2]. В противном случае должна быть выполнена проверка железобетонной плиты на изгиб.

$$\alpha l < 0,8 \quad (1.4)$$

Если требуется подобрать длину плиты  $l$  при заданной толщине  $H$ , чтобы считать ее жесткой, т.е. проверка на изгиб не требуется, то исходя из условия (1.4):

$$l < \frac{0,8}{\alpha} \quad (1.5)$$

или

$$l < 0,8 \sqrt[4]{\frac{4D}{k_{пB}}} = 0,8 \sqrt[4]{\frac{4E_b J_b}{k_{пB}(1-\mu_b^2)}} = 0,8 \sqrt[4]{\frac{E_b H^3}{3k_{п}(1-\mu_b^2)}} \quad (1.6)$$

В этом случае сжимающие напряжения  $\sigma_b$ , действующие на плиту XPS ТЕХНОНИКОЛЬ, равны :

$$\sigma_b = \frac{Q}{Bl} \quad (1.7)$$

Если же следует подобрать толщину плиты  $H$ , при заданной длине плиты  $l$ , то условие жесткости плиты выполняется при условии:

$$H > \sqrt[3]{\left[ \frac{k(1-\mu^2)}{7,32E_b} \right] l^4}$$

В предыдущей работе была рассмотрена задача о требуемой толщине слоя песка над плитами XPS ТЕХНОНИКОЛЬ (защитного слоя) исходя из условия сохранения прочности плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ. Полученные данные о требуемой толщине защитного слоя могут быть использованы в случае, если плитами XPS ТЕХНОНИКОЛЬ уложена нежесткая дорожная

одежда. Однако в расчете толщины защитного слоя из песка прочность самого слоя (возможность сдвигов в нем) не рассматривалась. Если же над плитами XPS ТЕХНОНИКОЛЬ устроена нежесткая дорожная одежда, то должен быть выполнен ее расчет по прочности в соответствии с действующими нормами [1], а также формулой, приведенной в Пособии[3].

## 2 РАСЧЕТ ЗНАЧЕНИЙ ДОПУСТИМОЙ ТОЛЩИНЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ НАД ПЛИТАМИ XPS ТЕХНОНИКОЛЬ

Рассмотрим следующую конструкцию: железобетонная плита уложена на плиту XPS ТЕХНОНИКОЛЬ, плита XPS ТЕХНОНИКОЛЬ лежит на подстилающем слое из песка, уложенном на грунтовое основание. Между железобетонной плитой и плитой XPS ТЕХНОНИКОЛЬ может быть устроен защитный слой из песка.

Определим коэффициент постели  $k_{\text{п}}$  под железобетонной плитой .

Введем следующие обозначения:

толщина бетонной плиты –  $H$ ;

толщина плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ–  $h_p$ ;

толщина слоя песка или иного материала, лежащего над плитой XPS; ТЕХНОНИКОЛЬ –  $h_s$ ;

модуль упругости бетонной плиты –  $E_b$ ;

модуль упругости плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ–  $E_p$ ;

модуль упругости песка, подстилающего плиту XPS ТЕХНОНИКОЛЬ, а также лежащего над плитой XPS ТЕХНОНИКОЛЬ защитного слоя песка –  $E_s$ ;

коэффициент Пуассона песка –  $\mu_s$ ;

коэффициент Пуассона пенополистирола–  $\mu_p$ ;

ширина плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ–  $b$ ;

радиус отпечатка следа колеса автомобиля–  $r$ ;

вертикальное напряжение, создаваемое нагрузкой от колеса –  $\sigma_b$ .

Примем, что к плите XPS ТЕХНОНИКОЛЬ приложена нагрузка Р в виде штампа радиусом r. Величина сжатия  $\delta_1$  плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ под нагрузкой  $\sigma_B$ , распределенной по кругу радиуса r, равна:

$$\delta_1 = \frac{\sigma_B}{(1-\mu_p^2)E_p} h_p \quad (2.1)$$

Величина максимальной осадки полупространства из песка  $\delta_2$  под той же нагрузкой, распределенной по кругу радиуса r, равна:

$$\delta_2 = \frac{\sigma_B r}{(1-\mu_s^2)E_s} \quad (2.2)$$

Определим коэффициент постели  $k_{\Pi}$  исходя из величины общей осадки:

$$\sigma_B = k_{\Pi} \left[ \frac{\sigma_B}{E_p} + \frac{\sigma_B}{E_s} \right] \quad (2.3)$$

Откуда  $k_{\Pi}$ :

$$k_{\Pi} = \frac{\left(\frac{E_p}{h_p(1-\mu_p^2)}\right) \left(\frac{E_s}{r(1-\mu_s^2)}\right)}{\left[\left(\frac{E_p}{h_p(1-\mu_p^2)}\right) + \left(\frac{E_s}{r(1-\mu_s^2)}\right)\right]} \quad (2.4)$$

Для дальнейших расчетов слоистое основание железобетонной плиты (подстилающий, защитный слой и плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ) нужно привести к одному эквивалентному материалу. Эквивалентная толщина  $h_e$  слоев песка под плитой, над плитой и самой плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ в случае расчета по упругому прогибу может быть определена из формулы:

$$E_s h_e = E_s h_s + E_p h_p \quad (2.5)$$

отсюда  $h_e$ :

$$h_e = \frac{E_s h_s + E_p h_p}{E_s} = h_s + h_p \frac{E_p}{E_s} = h_s \left(1 + \frac{h_p E_p}{h_s E_s}\right) \quad (2.6)$$

Коэффициент постели  $k_{\Pi}$  в этом случае равен :

$$k_{\Pi} = \frac{(1-\mu_s^2) E_s}{h_e} \quad (2.7)$$

Коэффициент жесткости  $\alpha$  равен :



$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{12k_{\Pi}}{4E_b H^3}} = \sqrt[4]{\frac{3k_{\Pi}}{E_b H^3}} \quad (2.8)$$

Давление  $\sigma_b$ , которое передается на плиту XPS ТЕХНОНИКОЛЬ со стороны колеса:

$$\sigma_b = \frac{P}{2b} \alpha \quad (2.9)$$

где  $P$  - нагрузка от колеса;

$$P = \pi r^2 p_0;$$

$p_0$  - давление в шинах.

Уравнение изогнутой оси железобетонной плиты в общем виде [5]:

$$w = \frac{P}{8E_b J_b \alpha^3} e^{-\alpha x} (\cos \alpha x + \sin \alpha x) \quad (2.10)$$

где  $w$  - прогиб;

$J_b$  - момент инерции бетонной плиты:

$$J_b = \frac{BH^3}{12};$$

Дифференцируя по  $dx$ , получаем:

$$\frac{dw}{dx} = -2\alpha e^{-\alpha x} (\sin \alpha x) \frac{P}{8E_b J_b \alpha^3} \quad (2.11)$$

Вторая производная:

$$\frac{d^2w}{dx^2} = 2\alpha^2 e^{-\alpha x} (-\cos \alpha x + \sin \alpha x) \frac{P}{8E_b J_b \alpha^3} \quad (2.12)$$

При  $x=0$

$$\frac{d^2w}{dx^2} = 2\alpha^2 \frac{P}{8E_b J_b \alpha^3} = \frac{P}{4E_b J_b \alpha} \quad (2.13)$$

Максимальный изгибающий момент  $M_b$  в железобетонной плите равен:

$$M_b = E_p J_p \frac{d^2w}{dx^2} = \frac{P}{4(1-\mu_b^2)\alpha} \quad (2.14)$$

Максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_{pb}$  в железобетонной плите равны:

$$\sigma_{pb} = \frac{M_b}{W_b} = \frac{6P}{4\alpha B(1-\mu_b^2)H^2} = \frac{3P}{2\alpha B(1-\mu_b^2)H^2} \quad (2.15)$$

где  $W_b$  - момент сопротивления железобетонной плиты:

$$W = \frac{BH^2}{6}; \quad (2.16)$$

Определим исходя из величины допустимого сжимающего напряжения  $\sigma$  пенополистирола необходимую толщину железобетонной плиты над плитой XPS ТЕХНОНИКОЛЬ.

$$\sigma = k \frac{P}{2b} \alpha \quad (2.17)$$

$$\alpha = \frac{2b}{kP} \sigma \quad (2.18)$$

где  $k$ -коэффициент запаса

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{3k_{\Pi}}{E_b H^3}} \quad (2.19)$$

Или:

$$\alpha^4 = \frac{3k_{\Pi}}{E_b H^3} = \left(\frac{2b}{kP} \sigma\right)^4 \quad (2.20)$$

Определим из последнего равенства необходимую толщину железобетонной плиты  $H$  :

$$H^3 = \frac{3k_{\Pi}}{E_b} \left(\frac{kP}{2b\sigma}\right)^4 \quad (2.21)$$

или

$$H = \sqrt[3]{\frac{3k_{\Pi}}{E_b} \left(\frac{kP}{2b\sigma}\right)^4} \quad (2.22)$$

#### 4 ПРИМЕР РАСЧЕТА

Исходные данные:

нагрузка на колесо  $P = 6,5$  (т);

давление в шинах  $p_0 = 0,6$ (МПа);

толщина плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ  $h = 0,04$ (м);

ширина плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ  $b = 0,6$ (м);

полуширина бетонной плиты  $B = 1,25$ (м);

длина бетонной плиты  $l = 6,0$  (м);

модуль упругости бетонной плиты  $E_b = 30000$  (МПа);

коэффициент Пуассона бетона  $\mu_b = 0,2$ ;

модуль упругости плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ  $E_p = 30$  (МПа);

коэффициент Пуассона плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ  $\mu = 0,5$ ;

прочность плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ на сжатие  $\sigma_{sp} = 0,25$  (МПа);

прочность плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ на растяжение при изгибе  $\sigma_{rp} = 0,7$ (МПа);

толщина песка под плитой XPS ТЕХНОНИКОЛЬ  $h_1 = 0,05$  (м);

модуль упругости песка под плитой XPS ТЕХНОНИКОЛЬ  $E_s = 100$  (МПа);

коэффициент Пуассона песка под плитой  $\mu_1 = 0,2$ ;

модуль упругости песка под плитой XPS ТЕХНОНИКОЛЬ  $E_1 = 100$ (МПа);

коэффициент Пуассона грунта основания  $\mu_0 = 0,2$

Расчет.

1. Определение минимальной толщины железобетонной плиты

1.1 Радиус следа колеса равен :

$$r = \sqrt{\frac{P}{100\pi p}} = \sqrt{\frac{6,5}{100 \cdot 3,14 \cdot 0,6}} = 0,19 \text{ (м)};$$

1.2 Коэффициент постели  $k_{\text{п}}$  исходя из величины общей осадки :

$$k_{\Pi} = \frac{\left(\frac{e}{h(1-\mu^2)}\right)\left(\frac{E_S}{r(1-\mu_S^2)}\right)}{\left[\left(\frac{e}{h(1-\mu^2)}\right) + \left(\frac{E_S}{r(1-\mu_S^2)}\right)\right]} = \frac{\left(\frac{30}{0,04(1-0,25)}\right)\left(\frac{120}{0,19(1-0,2^2)}\right)}{\left[\left(\frac{30}{0,04(1-0,25)}\right) + \left(\frac{120}{0,19(1-0,2^2)}\right)\right]} = 397 \left(\frac{\text{МПа}}{\text{м}}\right);$$

1.3 Минимальная толщина бетонной плиты равна :

$$H = \sqrt[3]{\frac{3k_{\Pi}(1-\mu_b^2)}{E_b} \left(\frac{k_S P}{2bq_c}\right)^4} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 397 \cdot 0,96}{30000} \left(\frac{0,065}{0,78 \cdot 0,25}\right)^4} = 0,08 \text{ (м)};$$

С учетом коэффициента запаса  $k=1,3$

$$H = 1,3 \cdot 0,08 = 0,10 \text{ (м)}$$

2. Если швы между железобетонными плитам не омоноличены, т.е. не работают, как бесконечная плита, и нагрузка от колеса автомобиля передается на соседнюю плиту не полностью, требуется проверка на растягивающие напряжения и изгиб.

2.1 Коэффициент жесткости  $\alpha$  равен :

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{3k_{\Pi}(1-\mu_b^2)}{E_b H^3}} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot 397 \cdot 0,96}{30000 \cdot (0,1)^3}} = \sqrt[4]{\frac{1143 \cdot 34}{30}} = 2,48 \left(\frac{1}{\text{м}}\right)$$

2.2 Максимальные действующие растягивающие напряжения  $\sigma_{mp}$  в плите XPS:

$$\sigma_{mp} = \frac{M_p}{w_p} = \frac{P}{4\alpha} \left(\frac{E_p J_p}{E_b J_b}\right) \frac{1}{w_p} = \frac{3P}{2\alpha} \left(\frac{E_b}{E H^3}\right) \frac{h(1-\mu_b^2)}{b(1-\mu_p^2)} = \frac{3 \cdot 0,065}{2 \cdot 2,48} \left(\frac{30}{30}\right) \frac{0,04}{0,38} \cdot 1,28 =$$

$$= 0,039 \cdot 1,95 \cdot 0,11 = 0,01 \text{ (МПа)}$$

По условию прочности  $\sigma_{mp} < \sigma_{гр}$ ;

$$0,01 \text{ (МПа)} < 0,7 \text{ (МПа)},$$

следовательно, растягивающие напряжения в плите меньше допустимых, условие прочности выполнено.

Ответ: требуемая толщина железобетонной плиты составляет 0,1 м. Для случая, если железобетонные плиты не работают, как бесконечная плита, выполнена проверка на растяжение. Растягивающие напряжения в плите XPS ТЕХНОНИКОЛЬ меньше допустимых, условие прочности выполнено.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1. Коэффициент спарен. колеса k=1,0 (колесо одиночное)

Транспортное средство	Вес, т	Кол-во колес ТС	Нагрузка от колеса ТС, кг	Прочность на сжатие при 10% линейной деформации				
				$\sigma = 0,20$ МПа; $E_{пл} = 17$ МПа	$\sigma = 0,25$ МПа; $E_{пл} = 17$ МПа	$\sigma = 0,30$ МПа; $E_{пл} = 17$ МПа	$\sigma = 0,40$ МПа; $E_{пл} = 20$ МПа	$\sigma = 0,50$ МПа; $E_{пл} = 20$ МПа
				Допустимая толщина ж/б плиты над плитой XPS ТЕХНОНИКОЛЬ, см				
Грузовой автомобиль	30	6	5600	14	10	8	6	4
Грузовой автомобиль	16	4	6000	15	11	8	6	5
Грузовой автомобиль	12	4	4500	13	9	7	5	–
Грузовой автомобиль	9	4	3388	11	8	6	–	–
Грузовой автомобиль	7	4	2630	9	7	5	–	–
Грузовой автомобиль	6	4	2550	9	6	5	–	–
Погрузчик	3,5	4	1490	7	5	–	–	–
Погрузчик	3,0	4	1280	6	–	–	–	–
Погрузчик	2,5	4	1060	6	–	–	–	–
Погрузчик	2,0	4	850	5	–	–	–	–

Таблица 2. Коэффициент спарен. колеса  $k=1,2$  (колесо сдвоенное)

Транспортное средство	Вес, т	Кол-во колес ТС	Нагрузка от колеса ТС, кг	Прочность на сжатие при 10% линейной деформации				
				$\sigma = 0,20$ МПа; $E_{пл} = 17$ МПа	$\sigma = 0,25$ МПа; $E_{пл} = 17$ МПа	$\sigma = 0,30$ МПа; $E_{пл} = 17$ МПа	$\sigma = 0,40$ МПа; $E_{пл} = 20$ МПа	$\sigma = 0,50$ МПа; $E_{пл} = 20$ МПа
				Допустимая толщина ж/б плиты над плитой XPS ТЕХНОНИКОЛЬ, см				
Грузовой автомобиль	30	6	5600	16	12	10	7	6
Грузовой автомобиль	16	4	6000	17	13	11	8	5
Грузовой автомобиль	12	4	4500	15	11	9	6	5
Грузовой автомобиль	9	4	3388	12	10	8	6	–
Грузовой автомобиль	7	4	2630	10	8	7	5	–
Грузовой автомобиль	6	4	2550	9	8	7	5	–
Погрузчик	3,5	4	1490	8	6	5	–	–
Погрузчик	3,0	4	1280	7	6	–	–	–
Погрузчик	2,5	4	1060	6	5	–	–	–
Погрузчик	2,0	4	850	6	–	–	–	–

Примечания. 1. Полученные результаты были округлены не по правилам округления, а в большую сторону.

2. Расчет был выполнен при следующих параметрах: модуль упругости бетона  $E_{бет} = 30000$  МПа; модуль упругости плиты XPS ТЕХНОНИКОЛЬ  $E_{пл} = 17$  МПа; давление в шинах автомобиля  $P = 0,6$  МПа; коэффициент запаса  $k_3 = 1,25$ .

3. Прочерки означают, что толщина плиты менее 5 см.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Проектирование нежестких дорожных одежд, ОДН 218.046-01, Москва, 2001.
- [2] Пособие по проектированию и устройству теплоизолирующих слоев из пенополистирольных экструзионных плит "ТЕХНОНИКОЛЬ XPS" в дорожных конструкциях
- [3] Методические рекомендации по проектированию жестких дорожных одежд (Взамен ВСН 197-91). М 2004.
- [4] Беляев Н.М., Сопротивление материалов, Государственное издательство технико-теоретической литературы, Москва 1949, Ленинград.
- [5] Флорин В.А. Основы механики грунтов т 1, Госстройиздат, Ленинград 1959 Москва.