



УДК 625.75: 519.3

**С.Н. Киялбай**

КазАДИ им. Л.Б. Гончарова, г. Алматы

**ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ НИЗКОТЕПЛОПРОВОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА**

При проектировании, строительстве и реконструкции земляного полотна, при определении глубины замерзания грунта земляного полотна и нижних слоев дорожной одежды неизбежно встречаются инженерные задачи, в которых необходимо знать влажность и температуру грунтов. С увеличением (или понижением) влажности в теле грунтового основания теплопроводность подвергается резкому изменению, причиной этого является наполнение пор влагой. Из теории тепломассообмена известно, что теплопроводность газов,  $\lambda=0,021$  Вт/(м·К) (в данном случае поры в грунте, наполненные воздухом), несколько ниже, чем жидкости  $\lambda=0,59$  Вт/(м·К) (поры, наполненные влагой) [1], поэтому теплопроводность слоя земляного полотна или основания дорожной одежды, обработанного грунтом, с повышением влажности, т.е. наполнением пор влагой, увеличивается (рис. 1).

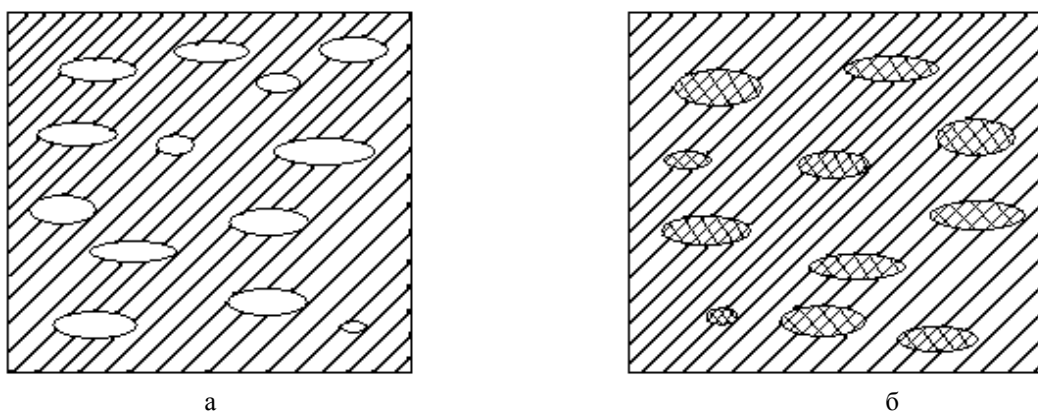


Рисунок 1 – Схема наполнения пор грунтового основания воздухом (а) и влагой (б)

При изучении физических свойств грунтов следует различать их характеристики, позволяющие охарактеризовать физическое состояние грунтов и дающие оценку поведения грунта под действием внешних сил. К первым относятся: коэффициент пористости, коэффициент влагонасыщенности, относительная плотность и пределы консистенции (густоты); ко вторым – коэффициент сжимаемости, коэффициент водопроницаемости, коэффициент внутреннего трения и модули деформируемости.

Как пористость, так и влажность грунтов зачастую необходимо определять не в абсолютных величинах, так как для различных грунтов они будут меняться в широких пределах, не характеризуя степени раздробленности и увлажнения грунтов, а в относитель-

ных, например по отношению к объему твердых частиц или как долю заполнения объема пор водой. Для вычисления этих характеристик и производных от них величин предварительно опытным путем для образцов грунта естественной ненарушенной структуры должны быть найдены три основных физических показателя:

- объемный вес грунта естественной ненарушенной структуры  $\gamma$ ;
- удельный вес твердых частиц грунта  $\gamma_v$ ;
- весовая влажность грунта естественной структуры  $\omega$ .

Более удобной характеристикой служит *коэффициент пористости*, равный отношению объема пор к объему твердых частиц грунта, который при действии нагрузки или при высыхании остается постоянным. Он равен [1-3]:

$$\varepsilon = \frac{n}{m} \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{n}{1-n}, \quad (1)$$

откуда

$$m = \frac{\gamma_c}{\gamma_y} \quad \text{и} \quad n = 1 - \frac{\gamma_c}{\gamma_y}, \quad (2)$$

тогда

$$\varepsilon = \frac{\gamma_y - \gamma_c}{\gamma_c}. \quad (3)$$

Определим вспомогательную в механике грунтов величину  $\omega_n$  – полную *влагоемкость грунта*, т.е. влажность, теоретически соответствующую полному заполнению пор водой.

На практике строители часто сталкиваются с проблемами, связанными с применением низкотеплопроводных материалов для снижения глубины промерзания грунтов. Использование таких материалов в автодорожной отрасли Казахстана еще не развито, но имеется опыт их применения. Например, на автомобильной дороге Омск-Майкапшагай (от гр. РФ до г. Павлодар) были использованы бокситовые шламы с усилением 2 %-ной цементной пылью, теплопроводность которых не превышает  $\lambda=0,6$  Вт/(м·К). Такой опыт применили и при строительстве автомобильных дорог Астана-Костанай-Челябинск (участок «Сурган-Аулиеколь») и Жаксы-Есиль-Бузулук (опытный участок км 35+500).

Передача теплоты в конструктивные слои дорожной одежды происходит от нагретого воздуха над поверхностью покрытия за счет солнечной радиации. А значит, этот процесс надо рассматривать как передачу теплоты от подвижной среды (воздух) через твердую поверхность (асфальтобетонное покрытие), которая называется теплопередачей.

В инженерных расчетах чаще всего рассматривается теплопередача от одной подвижной среды к другой через разделяющую их твердую многослойную поверхность. При этом задаются температуры сред  $t_{ж1}$  и  $t_{ж2}$ , и их коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Так как дорожная одежда состоит из конструктивных слоев, то ее можно рассматривать как многослойную поверхность, состоящую из  $n$  слоев. Коэффициент теплопроводности каждого слоя дорожной одежды –  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$  и их толщина –  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$ .

Согласно закону Фурье общее количество тепла, передаваемое через конструктивные слои дорожной одежды в процессе теплопередачи через единицу поверхности  $F$  за время  $\tau$ , определяется [4]

$$Q_\tau = k(t_{ж1} - t_{ж2})F\tau. \quad (4)$$

Плотность теплового потока в процессе теплопередачи определяется уравнением [4-6]

$$q = k(t_{ж1} - t_{ж2}), \quad (5)$$

отсюда

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (6)$$

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, который выражает количество тепла, проходящее через единицу площади поверхности покрытия за единицу времени при разности температур между слоями дорожной одежды, также между горячей и холодной средой в 1 °С;  $R$  – термическое сопротивление, обратное коэффициенту теплопередачи.

Исходя из формул (4-7), выражение для расчета глубины промерзания дорожной конструкции  $h_{np}$  как слоистой системы имеет вид:

$$h_{np} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T \cdot K_{yn}}{\rho_{on} \cdot W \cdot \delta} \left[ t_L - t_B + (t_B - t_G) \frac{R_{II} + R_0}{R} \right]}, \quad (8)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, ккал/м·ч·град;  $\rho$  – скрытая теплота льдообразования, равная 80 ккал/кг;  $W$  – влажность грунта, %;  $p_{on}$  – оптимальная плотность грунта при стандартном уплотнении, т/м<sup>3</sup>;  $t_B, t_G, t_L$  – температура воздуха, грунта и льдообразования;  $R_0$  – тепловое сопротивление дорожной одежды, град·м<sup>2</sup>/Вт.

В [1] нами была разработана методика расчета глубины промерзания земляного полотна с учетом теплофизических свойств материалов дорожной одежды и естественной влажности ее грунта. В практике зарубежных и отечественных исследователей имеются данные о том, что низкотеплопроводные материалы существенно могут снижать влияние температуры воздуха сверху и влаги – снизу. В связи с этим, предлагается ряд примеров задач, направленных на разработку рекомендаций по выбору конструкций дорожных одежд с учетом регулирования водно-теплового режима, т.е. глубины промерзания грунта, в теле земляного полотна.

*1. Постановка задачи.* При влажности грунта  $W$ , плотности  $\rho$  и теплопроводности  $\lambda$  определить глубину промерзания грунта для климатических условий западного региона Казахстана. При этом, согласно СНиП 2.01.01-82, для тяжелого пылеватого суглинка, характерного для западного региона Казахстана, температуру льдообразования принимаем равной  $t_L = -0,9$  °С.

*Пример 1. 1. Постановка задачи.* Определить глубину промерзания грунта земляного полотна в обычных конструкциях дорожной одежды с основанием из песчано-гравийной смеси, укрепленной 4%-м портландцементом.

*2. Объекты исследования.* Атырауская и Актюбинская области.

*3. Исходные данные для первого варианта.* Расчетные показатели по метеорологическим условиям представлены в табл. 1. Тепловое сопротивление, характеризующее теплообмен покрытия с воздухом –  $R_n = 0,04$  град·м<sup>2</sup>/Вт. Среднегодовую толщину выпав-

шего снега за весь период промерзания принимаем: для Атырауской области:  $-0,08$  м; Актюбинской  $-0,14$  м.

В первом варианте теплоизоляционные слои или низкотеплопроводные материалы не используются. Конструкция дорожной одежды состоит: 1-й слой – мелкозернистый а/б,  $h_1=0,05$  м,  $\lambda_1=0,76$  Вт/(м·К); 2-й слой – крупнозернистый пористый а/б –  $h_2=0,08$  м,  $\lambda_2=1,05$  Вт/(м·К); 3-й слой – песчано-гравийная смесь, укрепленная 4 %-м портландцементом,  $h_3=0,17$  м,  $\lambda_3=2,09$  Вт/(м·К); 4-й слой – природный гравий,  $h_4=0,21$  м,  $\lambda_4=2,62$  Вт/(м·К).

1. Решение задачи.

Для Атырауской области.

Определяем

$$R_0 = \frac{0,05}{0,76} + \frac{0,08}{1,05} + \frac{0,17}{2,09} + \frac{0,21}{2,62} = 0,303 \text{ град}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}.$$

Общее тепловое сопротивление определяется по формуле

$$R = \frac{3,2}{1,76} + \frac{0,04}{0,42} = 2,25 \text{ град}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}.$$

Подставляя полученные значения в формулу 8, определяем глубину промерзания грунта:

$$h_{np} = \sqrt{\frac{2,95 \cdot 2928 \cdot 0,98}{80 \cdot 0,51 \cdot 1700} \left[ -0,9 + 11,0 + (-11,0 - 4,2) \frac{0,08 + 0,303}{2,25} \right]} = 0,96 \text{ м}.$$

Во втором варианте в качестве теплоизоляционного слоя использован материал Styrofoam (рис. 2),  $h_5=0,07$  м,  $\lambda_5=0,24$  Вт/(м·К). При этом:

$$R_0 = \frac{0,05}{0,76} + \frac{0,08}{1,05} + \frac{0,17}{2,09} + \frac{0,21}{2,62} + \frac{0,07}{0,14} = 0,803 \text{ град}\cdot\text{м}^2/\text{Вт},$$

$$R = \frac{3,2}{1,76} + \frac{0,04}{0,42} = 2,25 \text{ град}\cdot\text{м}^2/\text{Вт},$$

$$h_{np} = \sqrt{\frac{2,95 \cdot 2928 \cdot 0,98}{80 \cdot 0,58 \cdot 1700} \left[ -0,9 + 11,0 + (-11,0 - 4,2) \frac{0,08 + 0,803}{2,25} \right]} = 0,59 \text{ м}.$$



Рисунок 2 – Технологический процесс укладки материала Styrofoam в нижнем слое дорожной одежды

В третьем варианте не используются теплоизоляционные материалы, однако в этом варианте гравийно-песчаный слой, укрепленный 4 %-м цементом, заменен низкотеплопроводным материалом - шлакобетоном плотностью  $\rho_3 = 1,5 \text{ т/м}^3$ ,  $h_3 = 0,17 \text{ м}$ ,  $\lambda_3 = 0,70 \text{ Вт/(м·К)}$ , при этом:

$$R_0 = \frac{0,05}{0,76} + \frac{0,08}{1,05} + \frac{0,17}{0,70} + \frac{0,21}{2,62} = 0,465 \text{ град·м}^2/\text{Вт},$$

$$R = \frac{3,2}{1,76} + \frac{0,04}{0,42} = 2,25 \text{ град·м}^2/\text{Вт},$$

$$h_{np} = \sqrt{\frac{2,95 \cdot 2928 \cdot 0,98}{80 \cdot 0,51 \cdot 1700} \left[ -0,9 + 11,0 + (-11,0 - 4,2) \frac{0,08 + 0,465}{2,25} \right]} = 0,88 \text{ м}.$$

Для Актюбинской области:

Вариант первый - без использования теплоизоляционного слоя и низкотеплопроводных материалов:

$$R_0 = \frac{0,05}{0,76} + \frac{0,08}{1,05} + \frac{0,17}{2,09} + \frac{0,21}{2,62} = 0,303 \text{ град·м}^2/\text{Вт}.$$

Общее тепловое сопротивление определяется по формуле

$$R = \frac{3,2}{1,84} + \frac{0,14}{0,32} = 2,18 \text{ град·м}^2/\text{Вт}.$$

Подставляя полученные значения в формулу 8, определяем глубину промерзания грунта:

$$h_{np} = \sqrt{\frac{3,71 \cdot 2928 \cdot 0,98}{80 \cdot 0,51 \cdot 1700} \left[ -1,1 + 11,0 + (-11,0 - 3,6) \frac{0,04 + 0,303}{2,18} \right]} = 1,08 \text{ м}.$$

Во втором варианте в качестве теплоизоляционного слоя также используется Styrofoam,  $h_5 = 0,07 \text{ м}$ ,  $\lambda_5 = 0,24 \text{ Вт/(м·К)}$ , при этом:

$$R_0 = \frac{0,05}{0,76} + \frac{0,08}{1,05} + \frac{0,17}{2,09} + \frac{0,21}{2,62} + \frac{0,07}{0,14} = 0,803 \text{ град} \cdot \text{м}^2/\text{Вт},$$

$$R = \frac{3,2}{1,84} + \frac{0,14}{0,32} = 2,18 \text{ град} \cdot \text{м}^2/\text{Вт},$$

$$h_{np} = \sqrt{\frac{3,71 \cdot 2928 \cdot 0,98}{80 \cdot 0,58 \cdot 1700} \left[ -1,1 + 11,0 + (-11,0 - 3,6) \frac{0,04 + 0,803}{2,18} \right]} = 0,70 \text{ м}.$$

В третьем варианте так же, как и в предыдущем примере, вместо гравийно-песчаного слоя, укрепленного 4 %-м цементом, применяется слой из низкотеплопроводного материала, т.е. шлакобетон, плотностью  $\rho_3=1,5 \text{ т/м}^3$ ,  $h_3=0,17 \text{ м}$ ,  $\lambda_3=0,70 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ , при этом:

$$R_0 = \frac{0,05}{0,76} + \frac{0,08}{1,05} + \frac{0,17}{0,70} + \frac{0,21}{2,62} = 0,465 \text{ град} \cdot \text{м}^2/\text{Вт},$$

$$R = \frac{3,2}{1,84} + \frac{0,14}{0,32} = 2,18 \text{ град} \cdot \text{м}^2/\text{Вт},$$

$$h_{np} = \sqrt{\frac{3,71 \cdot 2928 \cdot 0,98}{80 \cdot 0,51 \cdot 1700} \left[ -1,1 + 11,0 + (-11,0 - 3,6) \frac{0,04 + 0,465}{2,18} \right]} = 0,99 \text{ м}.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Сводная ведомость результатов расчета по определению глубины промерзания грунта  
земляного полотна

№ пп	Показатели	по Атырауской области			по Актыбинской области		
		Варианты			Варианты		
		1	2	3	1	2	3
1	Влажность грунта, %	20			20		
2	Плотность грунта, т/м <sup>3</sup>	1,7			1,7		
3	Теплопроводность грунта з.п., Вт/(м·К)	2,95			3,71		
4	Толщина среднего покрова, м	0,08			0,14		
5	Теплопроводность снежного покрова, Вт/(м·К)	0,42			0,32		
6	Тепловое сопротивление дорожной одежды R <sub>0</sub> , град·м <sup>2</sup> /Вт	0,303	0,803	0,465	0,303	0,803	0,465
7	Общее тепловое сопро- тивление, град·м <sup>2</sup> /Вт	2,25			2,18		
8	Глубина промерзания земляного полотна, м	0,96	0,59	0,88	1,08	0,70	0,99

Анализ результатов расчета. Для сравнения показателей, влияющих на снижение глубины промерзания земляного полотна, были рассмотрены 3 варианта конструкций дорожной одежды.

В первом варианте конструкция дорожной одежды не имеет теплоизоляционного слоя и в ее слоях отсутствуют низкотеплопроводные материалы, т.е. здесь принят: двухслойный асфальтобетон, гравийно-щебеночная смесь, укрепленная 4 %-м цементом и природный гравий. Второй вариант аналогичен первому, но здесь добавлен дополнительный теплоизоляционный слой из Styrofoam. Данный материал обладает большой теплоизоляционной способностью, его коэффициент теплопроводности –  $0,14 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , толщина –  $0,07 \text{ м}$ . В третьем варианте вместо гравийно-песчаного слоя, укрепленного 4 %-м цементом, применяется слой из шлакобетона плотностью  $\rho_3 = 1,5 \text{ т/м}^3$ , толщиной  $h_3 = 0,17 \text{ м}$  и коэффициентом теплопроводности  $\lambda_3 = 0,70 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

Во втором варианте, где был применен теплоизоляционный слой из низкотеплопроводного материала, глубина промерзания грунта ощутимо снизилась по сравнению с первым. Этот показатель для дорог Атырауской области достиг  $h_{np}=0,59 \text{ м}$ , для Актюбинской области –  $h_{np} = 0,70 \text{ м}$ , а глубина промерзания грунта на этих областях соответственно  $1,2$  и  $1,6 \text{ м}$ . Однако расчеты показали, что глубина промерзания земляного полотна по всей ее поверхности не может быть равномерной. Здесь, прежде всего, огромное влияние оказывает ширина укладываемого теплоизоляционного слоя. Если ширина теплоизоляционного слоя ограничится только по ширине дорожной одежды, тогда разность промерзшей поверхности для Актюбинской области составит  $\Delta h_{np}=1,6-0,7=0,90 \text{ м}$ , при укладке этого слоя по всей ширине разность глубины промерзания по ширине проезжей части для этой области снизится до  $\Delta h_{np}=0,96-0,7=0,26 \text{ м}$  (рис. 3).

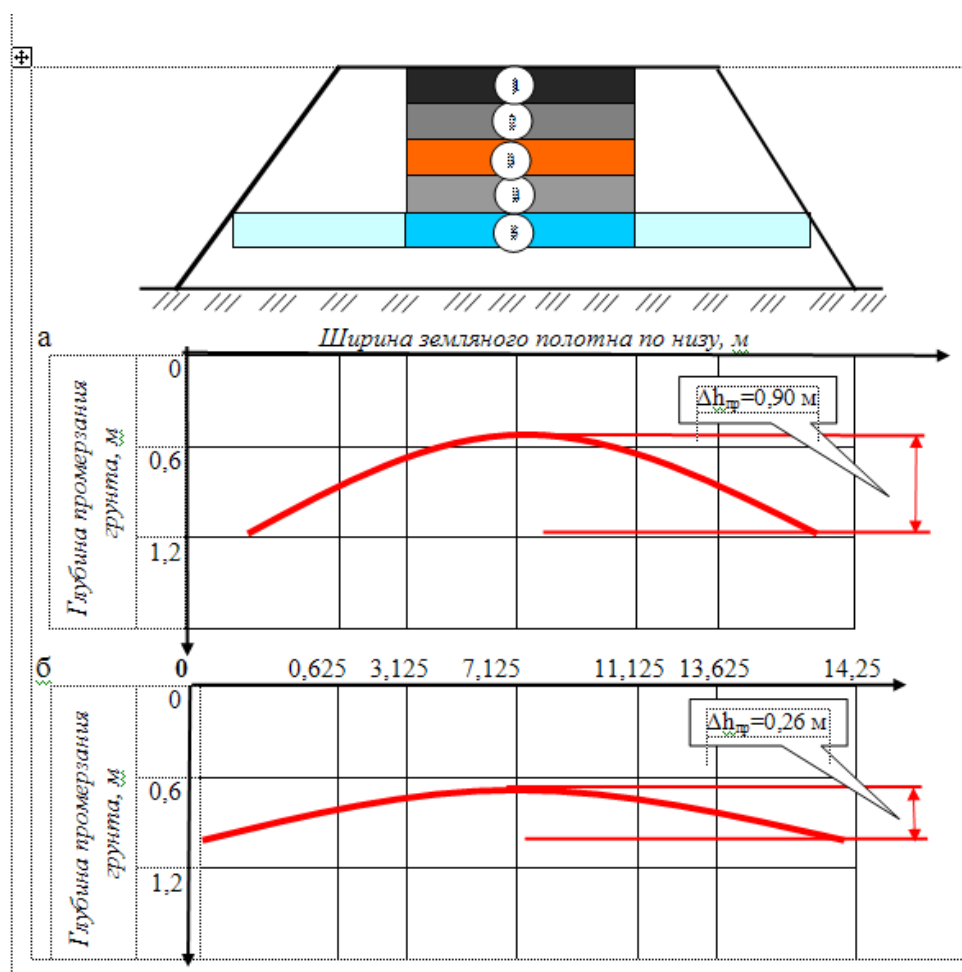


Рисунок 3 – Эпюра глубины промерзания грунта земляного полотна при различной ширине теплоизоляционного слоя: а – теплоизоляционный слой уложен только под дорожной одеждой; б – теплоизоляционный слой уложен по всей ширине земляного полотна

Теоретически обосновано применение различных вариантов дорожной конструкции, которые влияют на изменение глубины промерзания грунта. Например, в первом варианте рассматривается применение в основаниях дорожной одежды гравийно-щебеночного слоя, укрепленного 4 %-м цементом, при этом толщина слоя принята  $h_3=0,17$  м, теплопроводность –  $\lambda_3=2,09$  Вт/(м·К). Во втором варианте предусматривается применение низкотеплопроводного слоя основания из шлакобетона плотностью –  $\rho_3=1,5$  т/м<sup>3</sup>, толщиной слоя  $h_3=0,17$  м и теплопроводностью  $\lambda_3=0,70$  Вт/(м·К).

В третьем варианте рассматривается низкотеплопроводный материал Styrofoam с толщиной слоя  $h_5=0,07$  м, теплопроводностью  $\lambda_5=0,14$  Вт/(м·К).

В табл. 2 приведены результаты расчета глубины промерзания земляного полотна.



Таблица 2

*Сводная ведомость результатов расчета по определению глубины промерзания грунта  
земляного полотна*

№ пп	Показатели	по Атырауской области			по Актыбинской области		
		Варианты			Варианты		
		1	2	3	1	2	3
1	Влажность грунта, %	20			20		
2	Плотность грунта, т/м <sup>3</sup>	1,7			1,7		
3	Теплопроводность грунта з.п., Вт/(м·К)	2,95			3,71		
4	Толщина снежного покрова, м	0,08			0,14		
5	Теплопроводность снежного покрова, Вт/(м·К)	0,42			0,32		
6	Тепловое сопротивление дорожной одежды R <sub>о</sub> , град·м <sup>2</sup> /Вт	0,303	0,803	0,465	0,303	0,803	0,465
7	Общее тепловое сопротивление, град·м <sup>2</sup> /Вт	2,25			2,18		
8	Глубина промерзания земляного полотна, м	0,96	0,59	0,88	1,08	0,70	0,99

Анализ результатов показывает, что на снижение глубины промерзания грунта земляного полотна существенное влияние оказывают низкотеплопроводные материалы в слоях дорожной одежды. Например, в первом варианте, где не используется ни теплоизоляционный слой, ни низкотеплопроводный материал, глубина промерзания достигла максимально высокого уровня (0,96 м - для Атырауской области и 1,08 м - для Актыбинской области), причем влияние климатических особенностей региона здесь оказалось не столь важным.

Список литературы

1. Цытович Н.А. Механика грунтов. Краткий курс. - М.: Высшая школа, 1973. - 280с.
2. Казарновский В.Д. Опыт сооружения земляного полотна автомобильных дорог в сложных природно-климатических условиях // Транспортное строительство. - 1999. - С. 7-9.
3. Падерин Ю.В. Основы расчета водно-теплого режима автомобильных дорог, сооружаемых на многолетнемерзлых грунтах. Дальний Восток / Ю.В. Падерин, А.И. Ярмолинский // Автомобильные дороги и безопасность движения. - 2002. - № 2. - С. 83-85.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. - 599 с.
5. Телтаев Б.Б. Влияние влажности и теплопроводности грунта на изменение водно-теплого режима земляного полотна и основания дорожной одежды /Б.Б. Телтаев, С.Н. Киялбай // Вестник КазАТК. - 2006. - № 2. - Алматы, 2006. - С. 28-32.
6. Киялбай С.Н. Теоретические предпосылки выбора теплоизолирующего слоя земляного полотна из влагонепроницаемых грунтов // Наука и инновации на железнодорожном транспорте. - Алматы, 2007.

Получено 8.02.12

УДК 624.154

**Ю.М. Новиков**

ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБЛИЖЁННЫХ И ТОЧНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ  
В БАЛКАХ ПРОЛЁТНЫХ СТРОЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ**

При определении усилий в балках пролётных строений железобетонных мостов важным является выбор расчётной схемы, которая должна быть относительно простой и достаточно точно отображать действительную работу пролётного строения. В проектной практике применяются как приближённые, так и точные методы расчёта. Для определения усилий от вертикальной подвижной нагрузки наиболее распространённым приближённым методом является метод коэффициентов поперечной установки (КПУ) в его различных вариантах. Под точными методами будем полагать методы, рассматривающие пролётное строение как пространственную систему. В настоящее время для расчёта любых строительных конструкций применяются методы, основанные на методе конечных элементов (МКЭ) с использованием таких компьютерных комплексов, как Scad, Лира и им подобные.

Целью данной работы является сравнение результатов расчёта по точному и приближённому методу.

В качестве приближённого метода принят метод КПУ в его наиболее точной постановке, а именно с учётом кручения балок [1]. Сравнение выполнено на примере расчёта типового разрезного бездиафрагменного пролётного строения с длиной балок 12 м [2].

При расчёте по методу КПУ для возможности использования компьютерных программ, основанных на МКЭ, при построении линий влияния давления на балки автором предложена расчётная схема в виде плоской рамы (рис. 1) [3, 4]. Балки реального пролётного строения заменены стойками рамы.

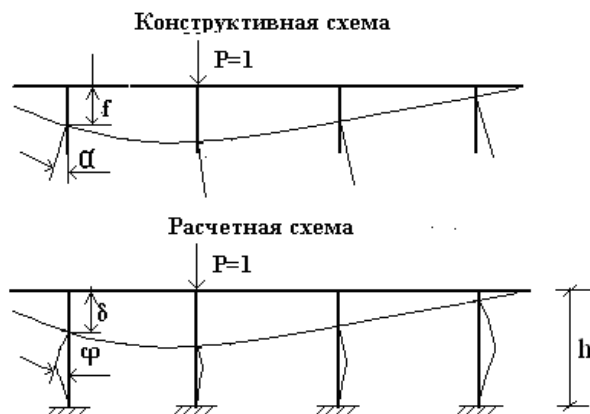


Рисунок 1 – К обоснованию расчётной схемы

Продольная и изгибная жёсткости стоек рамы определяются из условия равенства деформаций элементов рамы и пролётного строения

$$\delta = f \quad \text{и} \quad \varphi = \alpha, \quad (1)$$

где  $\delta$  - деформация стойки от сосредоточенной силы  $P=1$  т;  $f$  - прогиб балки от распределённой по длине балки нагрузки  $p=1$  т/м;  $\varphi$  - угол поворота стойки от единичного момента  $M=1$  тм;  $\alpha$  - угол закручивания балки от единичного распределённого по длине балки крутящего момента  $m=1$  тм/м.

Продольная жёсткость стойки при  $P=1$  т и  $\delta=f$  определяется формулой

$$EF_2 = \frac{h}{f}. \quad (2)$$

Изгибная жёсткость стойки при  $M=1$  т и  $\varphi = \alpha$  будет

$$EI_2 = \frac{h}{\varphi}. \quad (3)$$

Жёсткости ригеля рамы определяются для плиты проезжей части шириной 1 м с учётом криволинейных вутов. Расчётная схема рамы и линии влияния давления на балки пролётного строения по приближённому методу автора приведены на рис. 2 и в табл. 1.

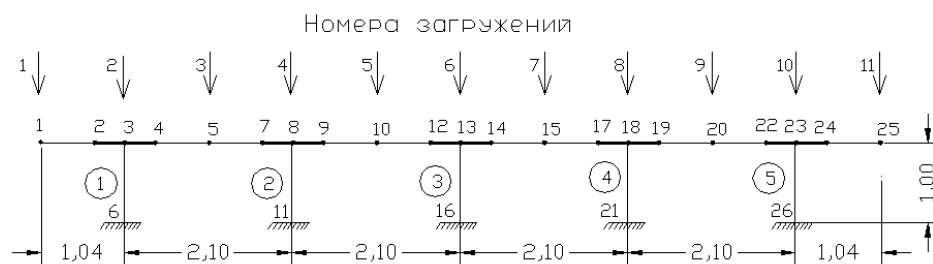


Рисунок 2 – Расчётная схема рамы

Точность предложенного автором приближённого метода определялась путём сравнения результатов расчёта с результатами, полученными для пространственной модели по МКЭ, и по результатам приближённого расчёта по инструкции ВСН 32-78 [2]. В качестве расчётной пространственной схемы принята система общего вида по ПК Scad (рис. 3).

Таблица 1

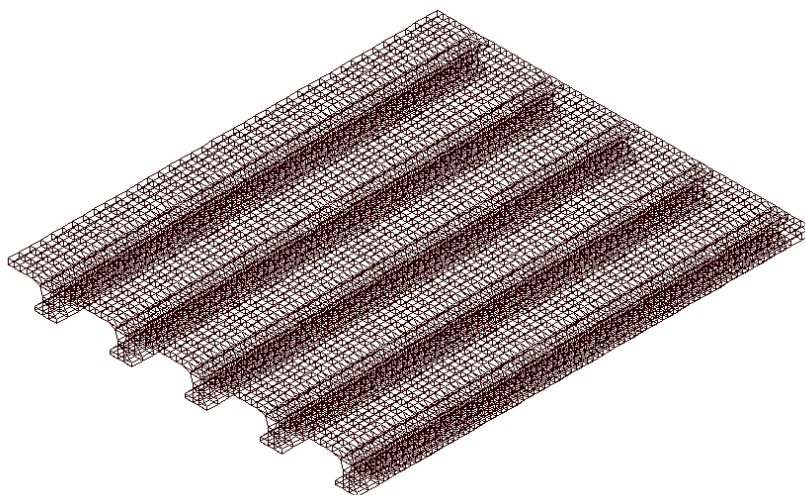
Ординаты линий влияния давления на балки

№ загруз.	Номера балок				
	1	2	3	4	5
1	- 0,9180	- 0,2047	0,03303	0,09971	0,09971
2	- 0,7231	- 0,2879	- 0,0601	0,01028	0,0608
3	- 0,4974	- 0,3899	- 0,1286	- 0,016	0,03188
4	- 0,2879	- 0,4311	- 0,2326	- 0,0587	0,01028
5	- 0,1403	- 0,3627	- 0,357	- 0,1257	- 0,0142
6	- 0,0601	- 0,2326	- 0,4146	- 0,2326	- 0,0601

7	- 0,0142	- 0,1257	- 0,357	- 0,3627	- 0,1403
8	0,01028	- 0,0587	- 0,2326	- 0,4311	- 0,2879
9	0,03188	- 0,016	- 0,1286	- 0,3899	- 0,4974
10	0,0608	0,01028	- 0,0601	- 0,2879	- 0,7231
11	0,09971	0,03306	0,03303	- 0,2047	- 0,9180

Точность предложенного автором приближённого метода определялась путём сравнения результатов расчёта с результатами, полученными для пространственной модели по МКЭ, и по результатам приближённого расчёта по инструкции ВСН 32-78 [4].

В качестве конечных элементов выбраны объёмные элементы типа 34 (6-узловой) и 36 (8-узловой). Поперечное сечение разбито на 26 элементов размером 0,3 м по длине пролёта.



Поперечное сечение пролётного строения

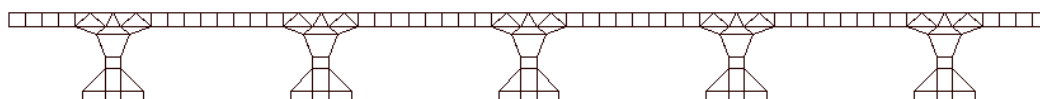


Рисунок 3 - Пространственная расчётная схема

Сравнение произведено путём определения среднего квадратичного отклонения от линии влияния, построенной для пространственной модели пролётного строения. Сравнение произведено как для всех точек кривой, так и для всех точек, кроме крайних.

Результаты сравнения представлены в табл. 2 и на рис. 4.

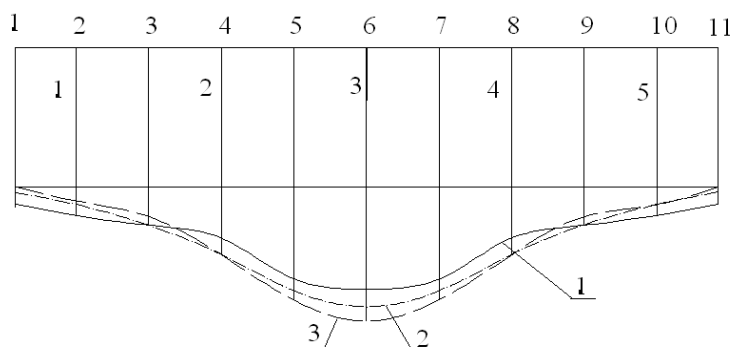


Рисунок 4 – Линии влияния давления на балку № 3: 1 – для пространственной модели; 2 – по предлагаемому методу; 3 – по инструкции ВСН 32-78

Таблица 2

Сравнительная оценка точности приближённых расчётов

Вариант расчёта	Номера балок		
	Б1	Б2	Б3
По методу автора			
1	0,006193	0,03172	0,05042
2	0,06413	0,03306	0,03461
3	0,22210	0,13240	0,17620
По инструкции ВСН 32-78			
1	0,05728	0,05474	0,05754
2	0,061567	0,05658	0,05816
3	0,21490	0,26870	0,30210

Примечание. Вариант 1 - среднеквадратичное отклонение по всем точкам; вариант 2 - среднеквадратичное отклонение по всем точкам, кроме крайних; 3 - отклонение по максимальной ординате.

Как видно из таблицы точность по методу автора для балок 2 и 3 во втором варианте превышает точность определения по инструкции ВСН 32-78. Наибольшие отклонения имеют место для крайней балки.

Представляет интерес сравнение приближённого и пространственного методов расчёта для балок пролётного строения от нагрузок, расположенных на проезжей части. В качестве нагрузок приняты: единичная сосредоточенная нагрузка, единичная нагрузка, распределённая по оси балки, и нагрузка, распределённая по площади всего пролётного строения.

Оценка точности производилась путём сравнения краевых нормальных напряжений в сечениях балки в точках, расположенных на вертикальной оси сечения. Анализ напряжённого состояния для пространственной модели показал, что в сечениях балки одновременно имеют место 6 составляющих усилий:  $M_y$ ,  $M_z$ ,  $N$ ,  $Q_y$ ,  $Q_z$ ,  $M_x$ . Наибольшие нормальные напряжения возникают от изгибающего момента, расположенного в вертикальной плоскости  $M_y$ , и продольной силы  $N$ . Ввиду того, что для пространственных конечных элементов ПК Scad выдаёт только напряжения по граням конечных элементов, произведено определение  $M$  и  $N$  по краевым нормальным напряжениям (рис. 5).

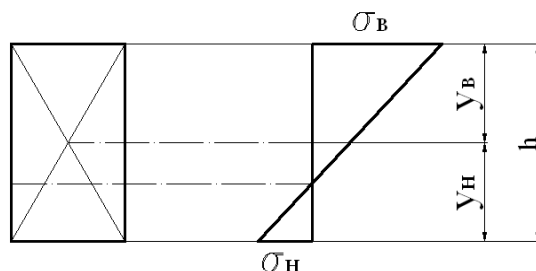


Рисунок 5 – К определению изгибающего момента и продольной силы по крайним нормальным напряжениям

$$M = \frac{(\sigma_n - \sigma_v)}{h} I ; \quad N = (\sigma_v + \frac{M}{I} y_v) F ; \quad N = (\sigma_n - \frac{M}{I} y_n) F , \quad (4)$$

где  $I$  – осевой момент инерции сечения,  $F$  – площадь поперечного сечения.

Результаты вычисления сведены в табл. 3, из которой видно, что в балках пролётного строения возникает как момент, так и продольная сила. Поэтому расчёт на прочность железобетонных балок следует производить так же, как и для балок, работающих на изгиб и продольную силу. Несмотря на наличие продольной силы, напряжения в сечениях с наибольшим изгибающим моментом незначительно отличаются от напряжений, определенных по приближённому способу.

Таблица 3

Номер балки, положение сечения	Точный метод				Приближённый метод		
	$\sigma_v$ , тс/м <sup>2</sup>	$\sigma_n$ , тс/м <sup>2</sup>	M, тс·м	N, тс	$\sigma_v$ , тс/м <sup>2</sup>	$\sigma_n$ , тс/м <sup>2</sup>	M, тс·м
<i>P=1 т, расположенная в середине пролёта</i>							
Б1.Середина пролёта	-12,65	23,51	2,061	-0,612	-11,88	23,77	1,952
Б1.Четверть пролёта	-4,481	5,840	0,5966	+0,6108	-5,940	11,88	1,030
Б3.Середина пролёта	-6,856	13,79	1,432	-0,7926	-6,817	13,63	1,182
Б3.Четверть пролёта	-1,436	2,433	0,2684	-0,2376	-3,408	6,817	0,591
<i>P=1т/м, расположенная по длине пролёта</i>							
Б1.Середина пролёта	-51,54	109,8	9,673	-1,034	-67,76	135,5	11,75
Б1.Четверть пролёта	-44,82	59,62	6,037	-5,964	-50,82	101,6	8,812
Б3.Середина пролёта	-31,35	66,62	5,685	+0,5654	-38,84	77,68	6,735
Б3.Четверть пролёта	-26,74	34,54	3,542	-3,705	-29,13	58,26	5,051
<i>Нагрузка, распределённая по всей поверхности плиты, <math>p=1\text{т/м}^2</math></i>							
Б3.Середина пролёта	-191,7	369,2	32,41	-2,75	-196,7	393,4	34,11

Эпюра изгибающего момента для балок от сосредоточенных нагрузок  $P=1$  т значительно отличается от линейной эпюры, определённой по формулам сопромата (рис. 6). Несмотря на это при  $P=1$  т из-за наличия продольной силы нормальные напряжения в середине сечения по точному и приближенному способу практически одинаковы.

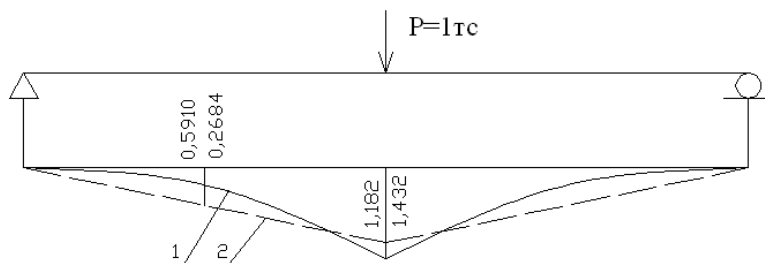


Рисунок 6 – Эпюра изгибающих моментов в бале БЗ при расчёте по точному (1) и приближённому (2) методам

На основании вышесказанного сделаны следующие выводы:

1. Приближённый метод, предложенный автором для нагрузок, расположенных в пределах проезжей части, даёт превышение усилий по сравнению с точным расчетом на 13-18 %. Метод, изложенный в инструкции ВСН 32-78 для нагрузок, расположенных в пределах проезжей части, даёт превышение усилий по сравнению с точным расчетом на 27-30 %.
2. Нормальные напряжения, определённые по приближённому и точному способам, близки между собой. Наибольшая погрешность для сечений с наибольшим моментом не превышает для сосредоточенной силы 6 %, для распределённой нагрузки  $p=1$  т/м достигает 23 %, для нагрузки  $p=1$  т/м<sup>2</sup> - практически совпадает.

#### Список литературы

1. Гишман М.Е. Проектирование транспортных сооружений. – М.: Транспорт, 1980. – 391 с.
2. Инструкция по определению грузоподъёмности железобетонных балочных пролётных строений автодорожных мостов // ВСН 32-78. Минавтодор РСФСР. – М.: Транспорт, 1979. – 142 с.
3. Новиков Ю.М. Определение давления на балки пролётных строений мостов с использованием ПЭВМ: Методические указания. – Усть-Каменогорск: Изд-во ВКГТУ, 2000.
4. Новиков Ю.М. Применение принципа эквивалентности при расчёте пролётных строений мостов // Тезисы докл. на Междунар. конф. – Усть-Каменогорск: Изд-во ВКГТУ, 2006.

Получено 6.03.12

УДК 624.012.8.001.24

**З.Н. Родионова, Л.П. Есипенко, Е.Б. Шестакова**  
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

#### К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ТРАНСВЕРСАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ НА ДЕФОРМАЦИЮ ОСНОВАНИЯ ОТ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ

Для обеспечения эксплуатационной надёжности, долговечности и экономичности со-

оружений проектом должна быть предусмотрена оценка инженерно-геологических условий площадки строительства с составлением инженерно-геологической модели основания. Реальные грунты очень редко бывают изотропными. Существующие экспериментальные исследования приводят к выводу, что действительные значения вертикальных напряжений в основаниях, являющихся наиболее важными для расчета осадок сооружений, часто существенно отличаются от расчетных, полученных на основе теории упругости изотропных сред. Они могут быть как больше, так и меньше расчетных величин. Одним из объяснений этому явлению является не учет анизотропии основания при определении напряжений. Влияние анизотропии на осадку сооружений может оказаться различным в зависимости от условий залегания грунтов. При горизонтальном и близком к нему залегании слоев, модуль деформации грунта в горизонтальном направлении значительно превышает модуль деформации в вертикальном направлении. В этих условиях осадка, рассчитанная без учета анизотропии, окажется больше, чем фактическая, что идет в запас устойчивости сооружения. При крутом или близком к вертикальному угле падения пород, модуль деформации в горизонтальном направлении может оказаться меньше, чем в вертикальном. В результате, осадка, рассчитанная как для изотропной среды, окажется меньше, чем фактическая, что может привести к недопустимым деформациям сооружений. Стремление приблизить теорию к экспериментальным результатам привело к появлению в механике грунтов различных расчетных моделей грунтовых оснований, отличающихся от модели упругой, однородной изотропной среды.

В предлагаемой работе в качестве модели принимается основание, обладающее цилиндрической анизотропией, то есть трансверсально-изотропное основание.

Цилиндрическая анизотропия - это анизотропия тела, обладающего следующими упругими свойствами. С телом неподвижно связана некоторая прямая - ось анизотропии. Все направления, пересекающие ось анизотропии под прямым углом - эквивалентны в отношении упругих свойств, также и все направления, параллельные оси, проведенные через разные точки тела и направления, ортогональные к первым двум.

Для определения вертикального перемещения точек упругого трансверсально-изотропного полупространства воспользуемся дифференциальной зависимостью между деформацией и перемещением [1]:

$$e_z = dw/dz \text{ или } dw_z = e_z \cdot dz. \quad (1)$$

$$\text{Отсюда получим: } w = \int_{\infty}^z e_z dw, \text{ но } e_z = -\nu_1 / E_z (\sigma_r + \sigma_\theta) + 1 / E_z (\sigma_z), \quad (2)$$

где  $E_z$  – модуль упругости в направлении оси «z»;  $E_r$  – модуль упругости в направлении оси «r»;  $\nu$  – коэффициент Пуассона, характеризующий сокращение в направлении оси «r» при растяжении в направлении оси «z»;  $\nu_1$  – коэффициент Пуассона, характеризующий сокращение в направлении оси «z» при растяжении в направлении оси «r».

$G$  – модуль сдвига.

Пределы изменения модуля сдвига берем следующие:

$$\frac{E_z}{2(1+\nu)} \geq \frac{E_r}{2(1+\nu_1)}, \text{ при отношении } 1 < \frac{E_r}{E_z} < 1.$$

В работе [1] рассмотрено действие сосредоточенной силы, приложенной на поверхно-



сти трансверсально-изотропного полупространства (рис. 1) и приведены формулы составляющих нормальных напряжений  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ , возникающих в любой точке полупространства.

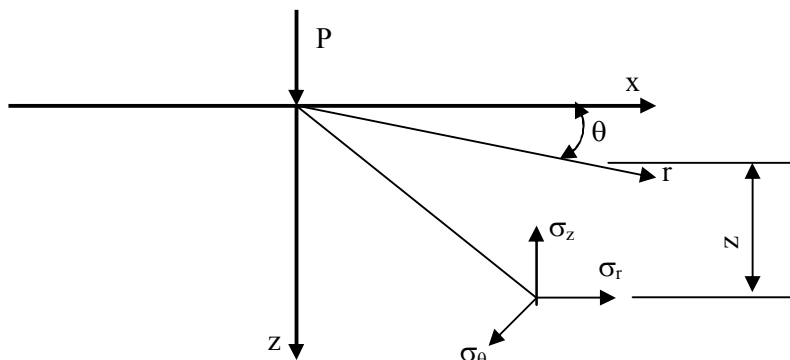


Рисунок 1

Подставим выражения составляющих нормальных напряжений [1, 2] в формулу (2). После преобразований получим формулу вертикальных перемещений точек полупространства от сосредоточенной силы.

$$W_z = -\frac{P}{\pi \cdot E_z \cdot r} \cdot W_z^1. \quad (3)$$

$$W_z^1 = \frac{k}{2(S_1 - S_2)} \left[ \frac{1}{\sqrt{k^2 + S_1^2}} \left( \frac{1}{S_1^2 \cdot \sqrt{d}} + \frac{v_1}{\sqrt{d}} - \frac{v_1 \cdot q_2 \cdot \sqrt{d}}{ac - d} \right) + \frac{1}{\sqrt{k^2 + S_2^2}} \left( \frac{v_1 \cdot q_1 \cdot \sqrt{d}}{ac - d} - \frac{1}{S_2^2 \cdot \sqrt{d}} - \frac{v_1}{\sqrt{d}} \right) \right], \quad (4)$$

где  $k = r/z$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  – корни характеристического уравнения [1];

$$a = \frac{a_{13}(a_{11} - a_{12})}{a_{11} \cdot a_{33} - a_{13}^2}, \quad b = \frac{a_{13}(a_{13} + a_{44}) - a_{12} \cdot a_{33}}{a_{11} \cdot a_{33} - a_{13}^2}, \quad c = \frac{a_{13} \cdot (a_{11} - a_{12}) + a_{11} \cdot a_{44}}{a_{11} \cdot a_{33} - a_{13}^2};$$

$$d = \frac{a_{11}^2 - a_{12}^2}{a_{11} \cdot a_{33} - a_{13}^2}, \quad a_{11} = \frac{1}{E_r}, \quad a_{12} = \frac{-\nu}{E_r}, \quad a_{33} = \frac{1}{E_z}, \quad a_{13} = \frac{-\nu_1}{E_z}, \quad a_{44} = \frac{1}{q_1};$$

$q_1, q_2$  – параметры, связанные с жесткостью основания [1].

Рассмотрим осадку поверхности полупространства в случае  $z=0$ . Тогда формула (4) будет иметь следующий вид:

$$W_{z=0} = -\frac{P}{\pi E_z r} \cdot W_{z=0}^1 \quad (5)$$

$$W_{z=0}^1 = \frac{S_1 + S_2}{2} \left[ \frac{a \cdot v_1 \cdot \sqrt{d}(1-b)}{ac - d} - \frac{1}{S_1^2 \cdot S_2^2 \cdot \sqrt{d}} \right]. \quad (6)$$

Таким образом, вертикальное перемещение точек поверхности упругого анизотропного полупространства под действием вертикальной сосредоточенной силы будет выра-

жаться формулой (6), структура которой совпадает с формулой осадок для изотропного полупространства, то есть

$$W = \frac{P(1-\nu^2)}{\pi \cdot E \cdot r}. \quad (7)$$

Следовательно при расчете фундаментов на грунтах, обладающих анизотропией, можно воспользоваться любым методом расчета фундаментов на упругом изотропном полупространстве, с заменой коэффициента в формуле осадок  $(1-\nu^2)$  на табличный коэффициент  $W_{z=0}^1$ .

Таблица значений  $W_{z=0}^1$

$\nu_l = \nu$	$E_z/E_r=0,2$	$E_z/E_r=0,5$	$E_z/E_r=0,75$	$E_z/E_r=1$	$E_z/E_r=1,5$	$E_z/E_r=2$	$E_z/E_r=5$
0,2	0,71	0,846	0,903	0,96	1,138	1,278	1,882
0,25	0,622	0,798	0,865	0,938	1,116	1,261	1,871
0,3	0,504	0,738	0,836	0,91	1,094	1,242	1,857
0,4	0,098	0,567	0,741	0,84	1,038	1,194	1,822
0,45	0	0,445	0,666	0,8	0,996	1,161	1,798

Анализируя формулу осадки (6) можно сделать следующие выводы.

При отношении  $E_z / E_r > 1$ :

- происходит увеличение величины осадки с уменьшением модуля  $E_r$ ;
- происходит уменьшение осадки для одного и того же отношения  $E_z / E_r$  с увеличением коэффициента Пуассона.

#### Список литературы

1. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропных тел. - М.: Техничко-теоретическая литература, 1950.
2. Родионова З.Н. Напряжения в ортотропной полуплоскости от внешней распределенной нагрузки / З.Н. Родионова, Л.П. Есипенко // Вестник ВКГТУ. - 2001. - № 3. - Усть-Каменогорск, 2001.

Получено 21.02.12

по страницам



**МЕНЬШЕ ВЕТРЯКОВ – БОЛЬШЕ ЭНЕРГИИ**

При проектировании крупных ветряных электростанций со множеством ветроэлектростанций расстояние между ними обычно принимают в семь диаметров ротора, а ротор мощного ветряка сейчас чаще всего имеет в диаметре около 90 метров. Однако опыты, недавно проведенные бельгийскими и американскими инженерами в аэродинамической трубе с дальнейшим моделированием на компьютерах, показали, что расстояние между ветряками, чтобы они не отнимали ветер друг у друга, надо увеличивать более чем вдвое – до 15 диаметров. Тогда можно будет либо сократить количество ветряков, сохранив их общую мощность, либо при том же их числе повысить мощность ветроэлектростанции.

«Наука и жизнь» № 4, 2011