



АВТОРЫ



СЕМЕНИУК С.Д.
Доктор техн. наук,
профессор,
заведующий
кафедрой
Белорусско-
Российского
университета



КЕТНЕР Э.А.
Магистрант
Белорусско-
Российского
университета



КУМАШОВ Р.В.
Аспирант Белорусско-
Российского
университета

НЕСУЩАЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПОКРЫТИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

УДК 624.159.14:12.35

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты численных исследований несущей способности железобетонных плит покрытия автомобильных дорог серии ВЗ.503.1-1, предназначенных для временных и постоянных автомобильных дорог, предварительно напряженных плит серии ВЗ.503.1-91 и плит с пороговыми неровностями испытательного полигона РУПП «БелАЗ». Предлагаемая методика расчета железобетонных плит покрытия автомобильных дорог по прочности нормальных и пространственных сечений выполнена на основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований.

The results of numerical studies of reinforced concrete carrying capacity slabs covering highways series ВЗ.503.3 -1 intended for temporary and permanent roads, prestressed slabs series ВЗ.503.3.1-91 and plates with irregularities threshold test site RUPE "BelAZ" are presented. The proposed method of calculation of reinforced concrete slabs covering roads at normal strength and spatial sections is executed on the basis of experimental and theoretical studies.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

железобетон, покрытие, плиты дорожные, сечения, полигон, прочность, несущая способность

ВВЕДЕНИЕ

В современных автомобильных дорогах все большее значение приобретают монолитные и сборные железобетонные покрытия, предназначенные для автомобильного движения большой интенсивности, скорости и грузоподъемности. Неравномерные деформации основания, возникающие при возведении и эксплуатации плит дорожного покрытия в сложных грунтовых условиях [1], следует считать одним из основных факторов, влияющих на их несущую способность, деформативность и долговечность. При эксплуатации дорог передача нагрузки на плиту дорожного покрытия от колес автомобиля всегда будет вне оси симметрии конструкции, а также не исключена вероятность образования выбоин, воронок и других дефектов под основанием плиты, поэтому в ней будут проявляться изгибающие и крутящие моменты, а также поперечная сила. В общем случае плиты работают на поперечный изгиб с кручением, в частности - на поперечный изгиб. Поэтому требуется учитывать влияние каждого из этих воздействий на несущую способность железобетонных плитных конструкций при их проектировании, изготовлении и эксплуатации.



ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛИТ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

В практике эксплуатации строительных конструкций часто возникают задачи по выявлению их технического состояния и действительной работы [2, 5]. Прямоугольная плита на упругом основании является важнейшим конструктивным элементом дорожного, промышленного, гидротехнического и аэродромно-дорожного строительства. Однако задача проектирования плитных конструкций, наилучшим образом удовлетворяющих экономическим и эксплуатационным условиям, не может быть выполнена без теоретически строгих и экспериментально обоснованных методов их расчета. Концептуальной стратегией современного строительства в Республике Беларусь, ближнем и дальнем зарубежье является повышение эксплуатационной надежности и качества объектов строительства при минимальном использовании ресурсов на их устройство.

В соответствии с техническим договором между РУПП «БелАЗ» и Белорусско-Российским университетом кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения» были запроектированы четыре типоразмера железобетонных плит покрытия дороги с пороговыми неровностями испытательного полигона РУПП «БелАЗ» и осуществлен авторский надзор по их изготовлению.

Опалубочные размеры этих плит представлены на рис. 1.

Плиты запроектированы в соответствии с [3] под нагрузку от карьерного самосвала грузоподъемностью 500 тонн при его торможении с замедлением 4 м/с^2 , которая может достигать 764 тонны на переднюю ось автомобиля. Длина всех плит 600 см, толщина одинаковая и равна 45 см. Класс бетона плит участка дороги с пороговыми неровностями – С25/30.

Также исследовались плиты железобетонные для покрытия временных 2ПП30.18-30 и постоянных дорог 1ПП30.18-30 по серии БЗ.503.1-1 и предварительно напряженные плиты ПДН серии БЗ.503.1-91. Плиты серии БЗ.503.1-1 - прямоугольные, размером $3000 \times 1750 \times 170$ мм; серии БЗ.503.1-91 - размером $6000 \times 2000 \times 140$ мм.

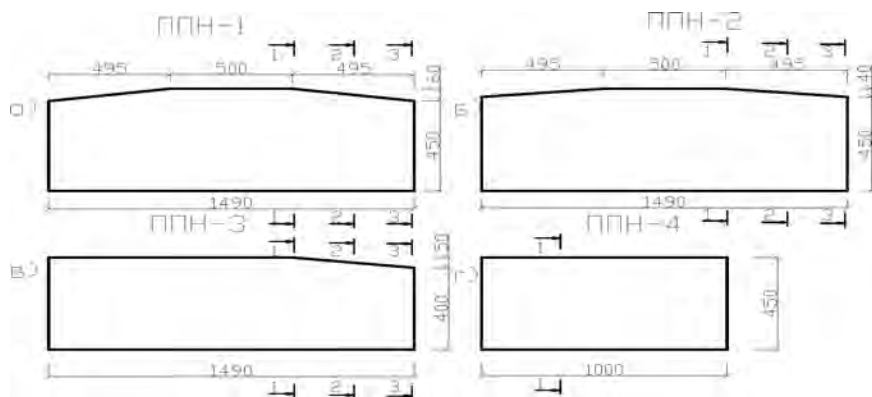


Рис.1. Поперечные сечения плит: а)-ППН-1; б)-ППН-2; в)-ППН-3; г)-ППН-4 (ППН - плита пороговых неровностей; 1, 2, 3, 4 - тип плиты, характеризующий поперечное сечение).

Опалубочные размеры и схемы армирования плит железобетонных для покрытий автомобильных дорог по серии БЗ.503.1-1 представлены на рис. 2, для плит по серии БЗ.503.1-91 - на рис. 3.

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПЛИТ

Расчет выполняется методом Б.Н. Жемочкина по специально разработанной программе, в которой, при определении коэффициентов канонических уравнений, задавались функцией прогибов прямоугольной плиты с защемленной в начале координат нормалью в виде особого решения и совокупности частных решений Клебша [4]. При этом для плит временных дорог (2ПП30.18-30) рассматривалось 16 вариантов загрузки, для плит постоянных дорог (1ПП30.18-30) и предварительно напряженных (ПДН) - 12 вариантов загрузки от автомобиля грузоподъемностью 30 тонн (кН). Статическая составляющая динамической нагрузки

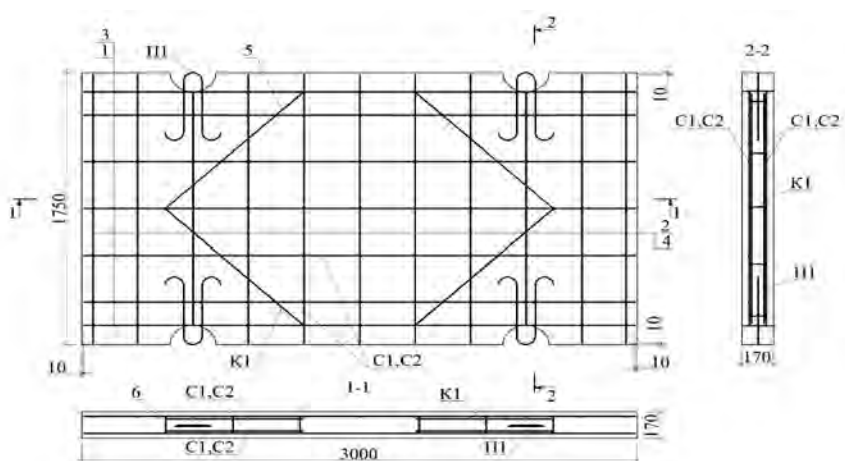


Рис.2. Опалубочные размеры и схемы армирования плит железобетонных для покрытий автомобильных дорог марок 1ПП30.18-30, 2ПП30.18-30.

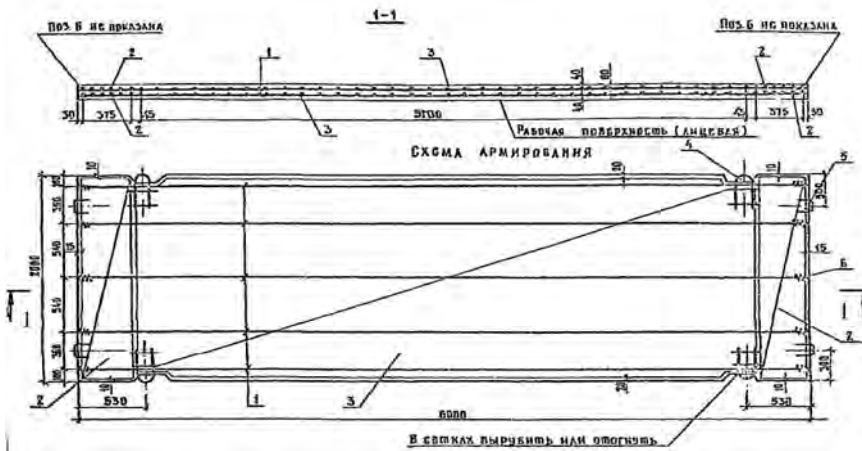


Рис.3. Опалубочные размеры и схемы армирования плит железобетонных преднапряженных по серии БЗ.503.1-1.

рез центр тяжести сжатой зоны. При этом, учитывая упруго-пластическую работу бетона, эпюру напряжений в сжатой зоне принимаем в виде прямоугольной трапеции [8].

А. Расчет прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента

Проверку прочности нормальных сечений (рис. 4) производят из условия:

$$M \leq M_u = 0,5 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x \cdot [(1 + \lambda_c) \cdot d - 0,33 \cdot x \cdot (1 + \lambda_c + \lambda_c^2)] + \sigma_{sc} \cdot A_{sc} \cdot (d - c') \quad (1)$$

на плиты временных и постоянных дорог от расчетного автомобиля составляет $Q_{op} = 195 \text{ кН}$ на колесо задней оси и $Q_{op} = 106,6 \text{ кН}$ на колесо передней оси [6]. Для плит дороги с пороговыми неровностями рассматривалось 2 варианта загрузки: центральное и краевое от карьерных самосвалов грузоподъемностью 500 тонн. Расчеты плит для дороги с пороговыми неровностями и для плит постоянных и временных дорог выполнены в соответствии с [7].

Результаты статического расчета плит представлены в табл. 1.

Таблица 1. Максимальные значения поперечных сил, изгибающих и крутящих моментов для плит дороги с пороговыми неровностями испытательного полигона РУПП «БелАЗ» и для плит постоянных и временных дорог

Маркировка Воздействие	ППН-1	ППН-2	ППН-3	ППН-4	1ПП30.18-30	2ПП30.18-30	ПДН
$Q_x (\text{кН} / \text{м})$	1598,40 987,10	1564,40 985,0	1581,20 986,80	532,30 -526,90	471,24 -88,00	632,44 -637,66	60,56 -22,19
$Q_y (\text{кН} / \text{м})$	1013,00 -733,34	981,40 -717,70	992,60 -726,90	13,072 -12,89	23,87 -24,46	27,84 -35,65	51,12 -72,08
$M_x (\text{кН} / \text{м})$	341,10 -69,00	332,10 -67,20	346,40 -80,70	41,28 -41,28	16,75 0,59	19,91 1,32	57,27 13,78
$M_y (\text{кН} / \text{м})$	1290,00 -153,30	1284,90 -154,20	1287,00 -179,10	630,00 -188,50	20,39 -7,01	-1,46 -25,45	55,21 -33,00
$M_{xy} (\text{кН} / \text{м})$	49,50 -49,50	48,60 -48,60	49,10 -49,10	54,05 -54,05	35,13 1,85	47,47 2,09	4,97 -14,77

Высоту сжатой зоны «x» находят из квадратного

$$A_1 \cdot x^2 + A_2 \cdot x + A_3 = 0; \quad (2)$$

$$A_1 = 0,5 \cdot (1 - \lambda_c^2) \cdot b; \quad (3)$$

$$A_2 = \alpha_m \cdot A_s - (1 - \lambda_c) \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \cdot A_s; \quad (4)$$

$$A_3 = -\alpha_m \cdot A_s \cdot c; \quad (5)$$

$$\lambda_c = 1 - \frac{f_{cd}}{\varepsilon_{c,u} \cdot E_{cd}}; \quad (6)$$

$$\alpha_m = \frac{E_s}{E_{cd}}; \quad (7)$$

КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ ПЛИТ

При действии на железобетонную плиту дорожного покрытия крутящих и изгибающих моментов разрушение происходит по пространственному сечению, образованному спиральной трещиной и замыкающей ее сжатой зоной, расположенной под углом α к горизонтальной оси элемента. Условие прочности в расчетном предельном состоянии выведено из соотношения моментов внешних и внутренних сил относительно оси, проходящей че-

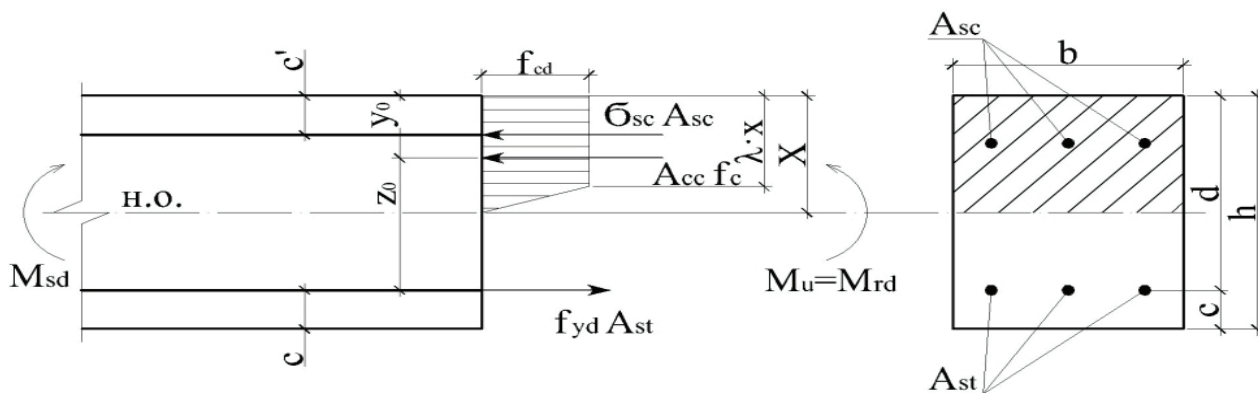


Рис.4. К расчету прочности нормальных сечений.

$$\sigma_{sc} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (x - c)}{(1 - \lambda_c) \cdot x} \quad (8)$$

При этом должно выполняться условие $\sigma_{sc} \leq f_{yd}$, в противном случае проверку прочности производят из условия (1) с учетом замены σ_{sc} на f_{yd} , тогда:

$$x = \frac{f_{yd} \cdot A_s - f_{sc} \cdot A_s}{0,5 \cdot (1 + \lambda_c) \cdot f_{cd} \cdot b} \quad (9)$$

Во всех случаях должно соблюдаться условие:

$$\frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d}{\alpha \cdot f_{cd} + 0,02 \cdot E_s \cdot (1 - \lambda_c)} \leq x \leq \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d}{\alpha \cdot f_{cd} + f_{yd} \cdot (1 - \lambda_c)} \quad (10)$$

При проектировании конструкций численные значения параметров f_{cd}, f_{ck}, f_{yd} и E_{cd} для применяемых бетонов определяют по [9], коэффициент пластичности λ_c вычисляют по формуле:

$$\lambda_c = 0,93 - 0,014 \cdot f_{cd} \quad (11)$$

или по данным натуральных испытаний [10].

В равенстве (11) значение f_{cd} выражено в МПа.

Б. Расчет прочности пространственных сечений

Теоретически доказано и подтверждено экспериментально, что распространение спиральной трещины в железобетонных элементах прямоугольного сечения, подверженных кручению, изгибу с кручением или воздействию поперечной силы и кручения происходит под углом 45° к продольной оси элемента [11].

Положение сжатой зоны в пространстве определяется параметром C_1 – проекцией отрезка нейтральной оси на продольную ось элемента. По нормали к этому сечению действуют проекции внешних расчетных моментов $M_y \cdot \sin \alpha$ и $T_x \cdot \cos \alpha$ (рис. 5),

$$\text{где } \sin \alpha = \frac{b}{b_T}; \cos \alpha = \frac{C_1}{b_T}; b_T = \sqrt{b^2 + C^2}, \quad (12)$$

$C_1 = (2 \cdot h + b) \cdot \text{ctg} \beta$ – проекция отрезка нейтральной оси на продольную ось элемента.

Из условия ограничения деформаций с учетом упругопластических характеристик бетона вычисляют граничную высоту сжатой зоны:

$$\lambda_{\text{lim}} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d \cdot \sin \alpha}{\alpha \cdot f_{cd} + f_{yd} \cdot (1 - \lambda_c)} \quad (13)$$

Так как арматурные стержни расположены не в одном уровне, то приведение их к сосредоточенному армированию дает погрешность. Поэтому расчет производим, полагая, что $|\sigma_{s1}| \geq f_{yd}; |\sigma_{s2}| < f_{yd}; |\sigma_{s3}| \geq f_{yd}$, тогда получаем следующие зависимости при кручении с изгибом:

$$\begin{cases} \sigma_{s1} = -f_{yd} \cdot \sin \alpha; \\ \sigma_{s2} = -\frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_2 - x)}{(1 - \lambda_c) \cdot x} \cdot \cos \alpha; \\ \sigma_{s3} = f_{yd} \cdot \cos \alpha; \\ \sigma_{s4} = f_{yd} \cdot \sin \alpha. \end{cases} \quad (14)$$

Высоту сжатой зоны «x» определяют из уравнения проекций всех сил, действующих в рассматриваемом пространственном сечении на нормаль и к плоскости сжатой зоны.

$$\begin{aligned} 0,5 \cdot (1 + \lambda) \cdot f_{cd} \cdot b_T \cdot x &= f_{yd} \cdot A_{st1} \cdot \sin \alpha + \\ &+ f_{yd} \cdot A_{st2} \cdot \cos \alpha - A_{sc1} \cdot \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_2 - x)}{(1 - \lambda_c) \cdot x} \cdot \sin \alpha - \\ &- A_{sc2} \cdot f_{yd} \cdot \cos \alpha + f_{ywd} \cdot A_{swr} \cdot \frac{b \cdot \text{ctg} \beta}{S} \cdot \sin \alpha - \\ &- f_{ywd} \cdot A_{swc} \cdot \frac{b \cdot \text{ctg} \beta}{S} \cdot \sin \alpha. \end{aligned} \quad (15)$$

Плечо внутренней пары сил для каждого арматурного ряда определяют из выражения:

$$Z_i = d_i - \frac{x \cdot (\lambda_c^2 + \lambda_c + 1)}{3 \cdot (\lambda_c + 1)} \quad (16)$$

Условие прочности в расчетном предельном состоянии при симметричном армировании плиты:

$$\begin{aligned} M_y \cdot \sin \alpha + T_x \cdot \cos \alpha &\leq \sigma_{st1} \cdot A_{sc1} \cdot z_{st1} \cdot \sin \alpha + \\ &+ \sigma_{st2} \cdot A_{st2} \cdot z_{st2} \cdot \cos \alpha + \sigma_{sc1} \cdot A_{sc1} \cdot z_{sc1} \cdot \sin \alpha - \\ &+ \sigma_{sc2} \cdot A_{sc2} \cdot z_{sc2} \cdot \cos \alpha + f_{ywd} \cdot A_{swr} \cdot \frac{b \cdot \text{ctg} \beta}{S} \cdot z_{swr} \cdot \\ &\cdot \sin \alpha + f_{ywd} \cdot A_{swc} \cdot \frac{b \cdot \text{ctg} \beta}{S} \cdot z_{swc} \cdot \sin \alpha, \end{aligned} \quad (17)$$



$$\sigma_{s1} = \sigma_{s4} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_i - x)}{(1 - \lambda_c) \cdot x} \cdot \sin \alpha, \quad (18)$$

$$\sigma_{s2} = \sigma_{s3} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_i - x)}{(1 - \lambda_c) \cdot x} \cdot \cos \alpha,$$

$$\lambda_{lim} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d}{\alpha \cdot f_{cd} + f_{yd} \cdot (1 - \lambda_c)} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 42,7}{8,333 \cdot 16,667 + 365 \cdot (1 - 0,697)} = 23,8 \text{ см.}$$

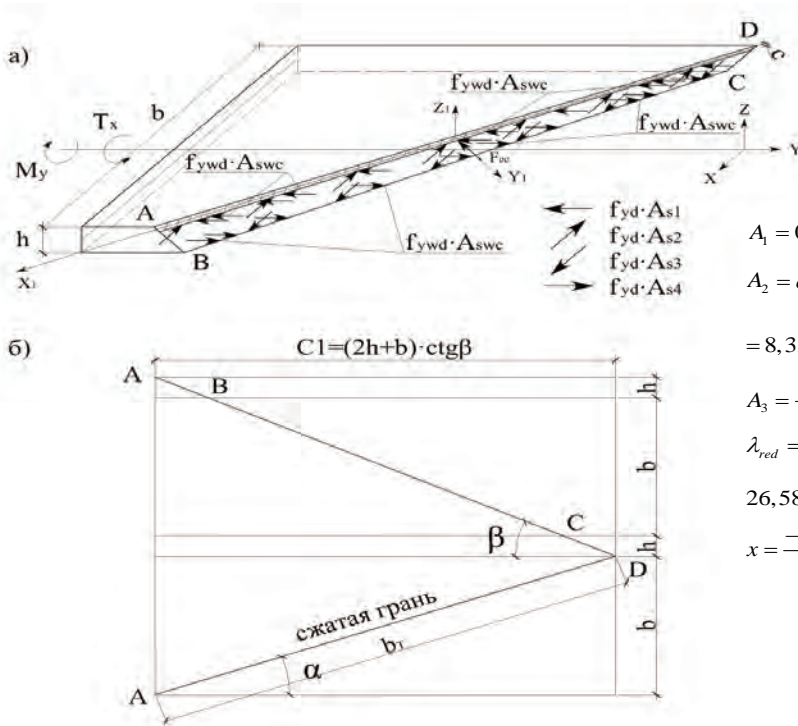


Рис.5. Расчетная схема пространственного сечения при совместном действии крутящего и изгибающего моментов: а) схема внешних и внутренних усилий; б) развертка граней пространственного сечения.

Высоту сжатой зоны определяем из квадратного уравнения:

$$A_1 \cdot x^2 + A_2 \cdot x + A_3 = 0;$$

где неизвестные при x:

$$A_1 = 0,5 \cdot (1 - \lambda_{zed}^2) \cdot b = 0,5 \cdot (1 - 0,802^2) \cdot 149,0 = 26,581;$$

$$A_2 = \alpha_m \cdot A_s - (1 - \lambda_{red}) \cdot \frac{f_{yd}}{f_{ed}} \cdot A_s = 8,333 \cdot 41,811 - (1 - 0,802) \cdot \frac{365}{16,667} \cdot 41,811 = 167,114;$$

$$A_3 = -\alpha_m \cdot A_s \cdot c = -8,333 \cdot 41,811 \cdot 5,0 = -1742,055;$$

$$\lambda_{red} = 1 - \frac{f_{cd}}{\varepsilon_{c,k} \cdot E_c} = 1 - \frac{16,667}{0,0035 \cdot 2,4 \cdot 10^4} = 0,802;$$

$$26,581 \cdot x^2 + 167,114 \cdot x - 1742,055 = 0;$$

$$x = \frac{-167,114 \pm \sqrt{167,114^2 + 4 \cdot 26,581 \cdot 1742,055}}{2 \cdot 26,581} = 11,828$$

Напряжения в сжатой арматуре вычисляем по формуле:

$$\sigma_{sc} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_i - x)}{(1 - \lambda_c) \cdot x} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot (5,0 - 11,828)}{(1 - 0,697) \cdot 11,828} = -264,605 \text{ МПа.}$$

Несущая способность сечения согласно формулы (1) составляет:

$$M_u = 0,5 \cdot 16,667 \cdot 149 \cdot 11,828 \cdot 10^2 \cdot [(1 + 0,697) \cdot 42,7 - 0,33 \cdot 11,828 \cdot (1 + 0,697 + 0,697^2)] + 264,605 \cdot 10^2 \cdot 22,121 \cdot (42,7 - 5) = 115976727 \text{ Н} \cdot \text{см} = 1159677 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

что на 1 м погонный составляет 778,4 кН м.

В качестве примера вычисляем несущую способность плиты ППН-2 по сечению нормальному к оси «у»

Поперечное сечение дорожной плиты принято по рис. 6. Монолитный бетон класса С25/30; арматура - 11Ø16м S400 с $A_{s1} = 22,12 \text{ см}^2$ и 11Ø22 S400 с $A_{s2} = 41,81 \text{ см}^2$

Для рабочей арматуры $f_{yd} = 365 \text{ МПа}$; $f_{yk} = 400 \text{ МПа}$; $E_s = 2,0 \cdot 10^5 \text{ МПа}$;

Определяем прочностные и деформативные характеристики бетона:

$f_{ck} = 25 \text{ МПа}$; $f_{cd} = 16,667 \text{ МПа}$; $f_{ctk}^m = 1,8 \text{ МПа}$; $f_{ctd}^m = 1,2 \text{ МПа}$; $E_{ck}^m = 3,2 \cdot 10^4 \text{ МПа}$; $E_{cd}^m = 2,4 \cdot 10^4 \text{ МПа}$.

Несущая способность бетонного сечения:

$$M = f_{cd} \cdot W_{pl} = 1,2 \cdot 96862 \cdot 0,1 = 11623 \text{ кН} \cdot \text{см} = 116,23 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$\text{где } W_{pl} = \frac{b \cdot h^2}{3,5} = \frac{149,0 \cdot 49^2}{3,5} = 96862 \text{ см}^3.$$

Коэффициент пластичности

$$\lambda_c = 0,93 - 0,014 \cdot 16,667 = 0,697.$$

$$d = d_2 = 447 - 50 = 427 \text{ мм} = 42,7 \text{ см},$$

$$\alpha_m = \frac{20,0 \cdot 10^4}{2,4 \cdot 10^4} = 8,333.$$

Граничная высота сжатой зоны:

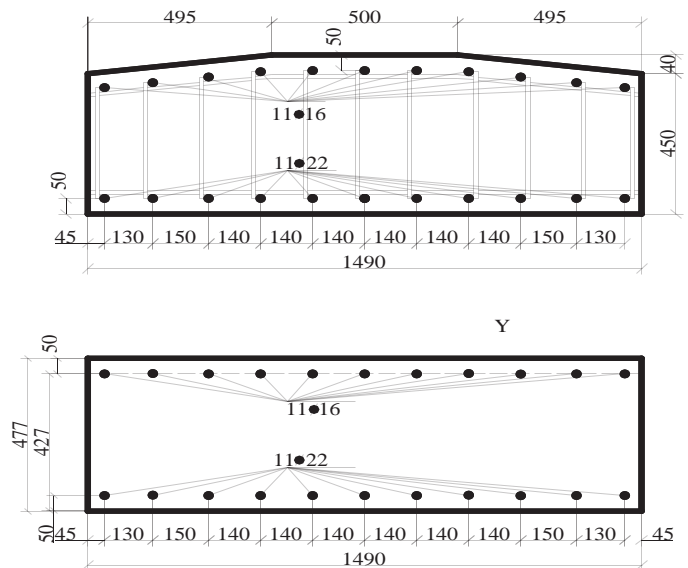


Рис.6. Поперечное сечение дорожной плиты ППН-2.

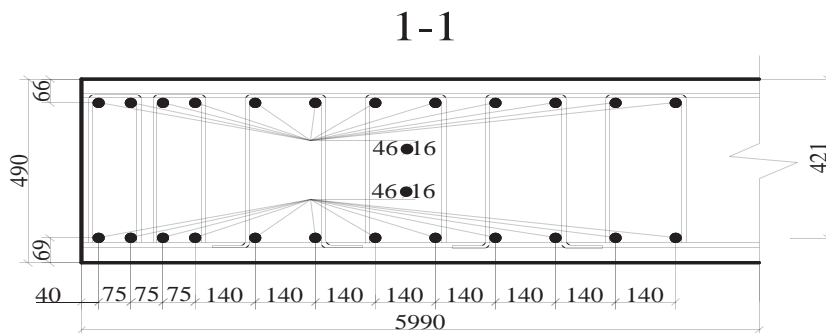


Рис.7. Сечение 1-1 дорожной плиты ППН-2.

Несущая способность плиты при совместном действии M_y и T_x

Монолитный бетон класса С25/30; арматура в продольном направлении 11Ø16 S400 с $A_{sc1}=22,121\text{см}^2$ и 11Ø22 S400 с $A_{st1}=41,811\text{см}^2$, в поперечном направлении 11Ø16 S400 с $A_{st2}=22,121\text{см}^2$ и 17Ø16 S400 с $A_{sc2}=34,187\text{мм}^2$. Для рабочей арматуры: $f_{yd}=365\text{МПа}$; $f_{yk}=400\text{МПа}$; $E_s=2,0\cdot 10^5\text{МПа}$;

Для хомутов: 6Ø10 S240 с $A_{swc}=4,71\text{см}^2$, 5Ø10 S240 с $A_{swt}=3,925\text{см}^2$;

где:

A_{sc1} – площадь верхней арматуры в продольном направлении;

A_{sc2} – площадь верхней арматуры в поперечном направлении;

A_{st1} – площадь нижней арматуры в продольном направлении;

A_{st2} – площадь нижней арматуры в поперечном направлении;

A_{swc} – площадь хомутов в сжатой зоне;

A_{swt} – площадь хомутов в растянутой зоне (площадь открьлок).

Для бетона: $f_{ck}=25\text{МПа}$; $f_{cd}=16,667\text{МПа}$; $f_{cm}=1,8\text{МПа}$; $f_{ctd}=1,2\text{МПа}$; $E_{ck}^m=3,2\cdot 10^4\text{МПа}$; $E_{cd}^m=2,4\cdot 10^4\text{МПа}$; $\lambda_c=0,6697$; $d=d_2=42,7\text{см}$, $\alpha_m=8,333$.

Ширина сжатой зоны от действия от действия M_y и T_x – по формуле (12):

$$C_1 = (2 \cdot 47,7 + 149) \cdot \text{ctg} 45^\circ = 244,4 \text{ см};$$

$$b_T = \sqrt{244,4^2 + 149^2} = 286,24 \text{ см},$$

$$\cos \alpha = \frac{244,4}{286,24} = 0,854;$$

$$\sin \alpha = \frac{149}{286,24} = 0,521.$$

Граничная высота сжатой зоны по формуле (13)
Высоту сжатой зоны «х» из формулы (15)

$$\begin{aligned} & 0,5 \cdot (1 - \lambda^2) \cdot f_{cd} \cdot b_T \cdot x^2 - f_{yd} \cdot A_{st1} \cdot \sin \alpha \cdot (1 - \lambda) \cdot x - \\ & - f_{yd} \cdot A_{st2} \cdot \cos \alpha \cdot (1 - \lambda) \cdot x + A_{sc1} \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot d \cdot \sin \alpha - \\ & A_{sc1} \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot x \cdot \sin \alpha + A_{sc2} \cdot f_{yd} \cdot \cos \alpha \cdot (1 - \lambda) \cdot x - \\ & - f_{ywd} \cdot A_{sw1} \cdot \frac{b \cdot \text{ctg} \beta}{S} \cdot \sin \alpha + f_{ywd} \cdot A_{swc} \cdot \frac{b \cdot \text{ctg} \beta}{S} \cdot \sin \alpha = 0; \\ & 0,5 \cdot (1 - 0,697^2) \cdot 16,667 \cdot 284,24 \cdot x^2 - 365 \cdot 41,811 \cdot \\ & \cdot 0,521 \cdot (1 - 0,697) \cdot x - 365 \cdot 22,121 \cdot 0,854 \cdot (1 - 0,697) \cdot \\ & \cdot x + 22,121 \cdot 8,333 \cdot 16,667 \cdot 42,7 \cdot 0,521 - 22,121 \cdot \\ & \cdot 8,333 \cdot 16,667 \cdot x \cdot 0,521 + 34,187 \cdot 365 \cdot 0,854 \cdot \\ & \cdot (1 - 0,697) \cdot x - 174 \cdot 3,925 \cdot 2 \cdot \frac{149 \cdot 1}{28} \cdot 0,521 + \\ & + 174 \cdot 4,71 \cdot \frac{149 \cdot 1}{23,3} \cdot 0,521 = 0. \end{aligned}$$

Несущая способность плиты по сечению нормальному к оси «х»

Монолитный бетон класса С25/30; арматура 92Ø16 S400 с $A_s=185,012\text{см}^2$. Для бетона: $f_{ck}=25\text{МПа}$; $f_{cd}=16,667\text{МПа}$; $E_{ck}^m=3,2\cdot 10^4\text{МПа}$; $E_{cd}^m=2,4\cdot 10^4\text{МПа}$.

Сечение 1-1, рисунок 7.

Несущая способность бетонного сечения:

$$M = f_{cd} \cdot W_{pl} = 1,2 \cdot 410914 \cdot 0,1 = 49309,7 \text{ кН} \cdot \text{см} = 493,1 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$\text{где } W_{pl} = \frac{b \cdot h^2}{3,5} = \frac{599,0 \cdot 49^2}{3,5} = 410914 \text{ см}^3.$$

Для определения несущей способности армированного сечения вычисляем граничную высоту сжатой зоны, предварительно определив коэффициент пластичности

$$\lambda_c = 0,697; \quad d = d_2 = 49 - 6,9 = 42,1 \text{ см}; \quad \alpha_m = 8,333.$$

$$\lambda_{lim} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 42,1}{8,333 \cdot 16,667 + 365 \cdot (1 - 0,697)} = 23,44 \text{ см}.$$

«х» находим из квадратного уравнения $A_1 x^2 + A_2 x + A_3 = 0$;

$$\text{где } A_1 = 0,5 \cdot (1 - \lambda_{red}^2) \cdot b = 0,5 \cdot (1 - 0,802^2) \cdot 599,0 = 106,86;$$

$$A_2 = \alpha_m \cdot A_s - (1 - \lambda_{red}) \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \cdot A_s = 8,333 \cdot 92,506 -$$

$$- (1 - 0,802) \cdot \frac{365}{16,667} \cdot 92,506 = 369,736;$$

$$A_3 = -\alpha_m \cdot A_s \cdot c = -8,333 \cdot 92,506 \cdot 6,9 = -5318,882;$$

$$\lambda_{red} = 1 - \frac{f_{cd}}{\varepsilon_{c,k} \cdot E_c} = 1 - \frac{16,667}{0,0035 \cdot 2,4 \cdot 10^4} = 0,802;$$

$$106,86 \cdot x^2 + 369,736 \cdot x - 5318,882 = 0; \quad x = 8,994 \text{ см}.$$

$$\sigma_{sc} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_1 - x)}{(1 - \lambda_c) \cdot x} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot (6,6 - 8,994)}{(1 - 0,697) \cdot 8,994} = -122,008 \text{ МПа}.$$

Несущая способность сечения составляет:

$$M_u = 0,5 \cdot 16,667 \cdot 599 \cdot 8,994 \cdot 10^2 \cdot [(1 + 0,697) \cdot 42,1 - 0,33 \cdot 8,994 \cdot (1 + 0,697 + 0,697^2)] + 122,008 \cdot 10^2 \cdot 92,506 \cdot (42,1 - 6,6) = 3317338557 \text{ Н} \cdot \text{см} = 3317,3 \text{ кН} \cdot \text{м}, \text{ что на 1 м погонный составляет } 553,8 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Для сечения 2-2 и сечения 3-3 по аналогии с сечением 1-1 определяем несущую способность плиты по нормальному сечению.

$$\text{Тогда: } M_u^{2-2} = 523,3 \text{ кН} \cdot \text{м}; \quad M_u^{3-3} = 540,1 \text{ кН} \cdot \text{м};$$



Таблица 2. Несущая способность плит покрытия дорог: по серии БЗ.503. – 1; серии БЗ.503.1 – 91 и плит дорог с пороговыми неровностями РУПП «БелАЗ»

Маркировка плит	1ПП30.18-30 серия БЗ.503.1-1	2ПП30.18-30 серия БЗ.501-1	ПДН серия БЗ.503.1-1	ППН-1 РУПП «БелАЗ»	ППН-2 РУПП «БелАЗ»	ППН-3 РУПП «БелАЗ»	ППН-4 РУПП «БелАЗ»
Моменты							
$M_x(\text{кН}\cdot\text{м})$	115,20	81,20	90,49	537,80	523,30	458,00	497,00
$M_y(\text{кН}\cdot\text{м})$	95,10	69,40	87,23	805,23	778,40	706,00	576,95
$M_{xy}(\text{кН}\cdot\text{м})$	47,50	33,10	7,84	200,4	195,50	186,50	130,25

тельно напряженных плит покрытия дорог по серии БЗ.503.1-1. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты статического и конструктивного расчетов железобетонных плит покрытия

Решая квадратное уравнение $1226,54x^2 - 2870,21x + 63135,2 = 0$ вычисляем высоту сжатой зоны $x = 8,4 \text{ см}$.

Плечо внутренней пары сил для каждого арматурного ряда определяем из выражения (16):

$$Z_i = d_i - \frac{x \cdot (\lambda_c^2 + \lambda_c + 1)}{3 \cdot (\lambda_c + 1)}, \text{ где } \frac{x \cdot (\lambda_c^2 + \lambda_c + 1)}{3 \cdot (\lambda_c + 1)} = \frac{8,5 \cdot (0,697^2 + 0,697 + 1)}{3 \cdot (0,697 + 1)} = 3,7 \text{ см}.$$

Тогда:

$$z_{sr1} = 42,7 - 3,7 = 39,0 \text{ см}; \quad z_{sr2} = 40,8 - 3,7 = 37,1 \text{ см}; \\ z_{sc1} = 5 - 3,7 = 1,3 \text{ см}; \quad z_{sc2} = 6,6 - 3,7 = 2,9 \text{ см}; \\ z_{swc} = 5,3 - 3,7 = 1,6 \text{ см}; \quad z_{swt} = 43,3 - 3,7 = 39,6 \text{ см}.$$

Определяем несущую способность дорожной плиты при восприятии крутящего и изгибающего моментов, предварительно определив напряжения в продольной рабочей арматуре нижней и верхней сеток армирования.

Определяем напряжения в арматурных стержнях нижней и верхней сеток по формуле (18):

$$\sigma_{sr1} = 975,14 \text{ МПа}; \quad \sigma_{sr2} = 1509,9 \text{ МПа}; \quad \sigma_{sc1} = -96,66 \text{ МПа}; \\ \sigma_{sc2} = -83,88 \text{ МПа}.$$

Несущая способность дорожной плиты при восприятии крутящего и изгибающего моментов вычисляется по формуле (17):

$$365 \cdot 41,811 \cdot 39 \cdot 0,521 \cdot 10^2 + 365 \cdot 22,121 \cdot 37,1 \cdot 0,854 \cdot 10^2 - \\ - 96,66 \cdot 22,121 \cdot 1,3 \cdot 0,521 \cdot 10^2 - 83,88 \cdot 34,187 \cdot 2,9 \cdot 0,854 \cdot 10^2 + \\ 174 \cdot 3,925 \cdot \frac{149 \cdot 1}{24} \cdot 39,6 \cdot 0,521 - 174 \cdot 4,71 \cdot \frac{149 \cdot 1}{23,3} \cdot 1,6 \cdot 0,521 = \\ = 55914651,8 \text{ Н}\cdot\text{см} = 559,15 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

что на 1 м погонный составляет 195,5 кН м.

По вышеприведенной методике были выполнены расчеты прочности нормальных сечений и расчеты прочности пространственных сечений для плит участка дороги испытательного полигона РУПП «БелАЗ» с пороговыми неровностями: ППН-1; ППН-3; ППН-4; а также для железобетонных плит покрытий временных дорог – 2ПП30.18 – 30; постоянных дорог – 1ПП30.18 и для железобетонных предвари-

автомобильных дорог свидетельствуют, что несущая способность плит при совместном воздействии крутящего и изгибающего моментов является наименьшей. В условиях эксплуатации плиты покрытия автодорог всегда будут подвержены сложному деформированию, так как нагрузки от колес автомобиля прикладываются вне оси симметрии дороги и дорожное основание под плиты неоднородно как по длине плиты, так и по ширине. Следовательно, при проектировании плиты дорожного покрытия необходимо в обязательном порядке проверять по прочности пространственных сечений. Элементы, подверженные кручению с изгибом, должны быть снабжены арматурой, воспринимающей воздействия изгибающего момента, поперечной силы и крутящего момента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенюк С.Д. Несущая способность железобетонных плит покрытия испытательного полигона РУПП «Белорусский автомобильный завод» / С.Д. Семенюк, Р.З. Шутов, Н.В. Белый // Геотехника Беларуси: наука и практика: сб. статей межд. науч.-техн. конф. - Минск: БНТУ, 2008. – С. 218-237.
2. Оценка надежности железобетонных элементов по прочности сечений наклонных к продольной оси [Савицкий Н.В., Баташева К.В., А.А. Тытюк, Шевченко Т.Ю.] // Сб. науч. тр. ПГАСА, 2004. – Вып. 29 – С. 98-101.
3. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02*. – Минск, 2003. – 139 с.
4. Босаков С.В. Статические расчеты плит на упругом основании / С.В. Босаков. – Минск: БНТУ, 2002. – 128 с.
5. Семенюк С.Д. Расчет несущей способности железобетонных конструкций, работающих на изгиб с кручением / С.Д. Семенюк, Ю.Г. Москалькова, С.В. Босаков // Ресурсоeкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВХП. – Вып. 30, 2015. – С. 263-270.
6. Семенюк С.Д. Статический расчет железобетонных плит дорожного покрытия на упругом основании / С.Д. Семенюк, Р.В. Кумашев // Перспективные направления иннова-



ционного развития строительства и подготовки инженерных кадров: Гродно 17-19 февраля 2016г., Гр ГУ им. Я. Купалы. - С. 163-170.

7. Автомобильные дороги. Дорожные одежды жесткого типа. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.05-244-2011(02250). – Минск, 2012. – 60 с.
8. Семенюк С.Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформированном основании / С.Д. Семенюк. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2003. – 269 с.
9. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий: ТКП EN 1992-1-1-2009*. – [Введ. 01.01.10.] – Минск: Минстройархитектуры РБ, 2015. – 206 с.
10. Семенюк С.Д. К определению модуля упругости и упругопластических характеристик бетона при кратковременном центральном сжатии / С.Д. Семенюк // Вестник БГТУ. – 2001. - №1. – С. 40-45.
11. Семенюк С.Д. Расчет железобетонных балок прямоугольного сечения при совместном воздействии поперечных сил, крутящих и изгибающих моментов / С.Д. Семенюк, А.В. Зезюлин, Е.Я. Семенюк // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. – Минск: Ин-т Бел НИИС; редкол: О.Н. Лешкевич [и др]. 2015. – Вып. 7. – С. 133-151.

REFERENCES

1. Semenyuk, S.D., Shutov R.Z. & Belyiy N.V. (2008). Nesuschaya sposobnost zhelezobetonnykh plit pokrytiya ispytatelnogo poligona RUPP «Belorusskiy avtomobilnyy zavod» [The bearing capacity of reinforced concrete slabs covering the test site RUPE "BelAZ"]. Geotekhnika Belarusi: nauka i praktika. Sbornik statey mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii - Collection papers of international scientific conference. (pp. 218-237). Minsk: BNTU [in Russian].
2. Savitskiy, N.V., Batasheva K.V., Tyityuk A.A. & Shevchenko T.Yu. (2004). Otsenka nadezhnosti zhelezobetonnykh elementov po prochnosti secheniy naklonnykh k prodolnoy osi [Evaluation of reliability of reinforced concrete elements on the strength of sections inclined to the longitudinal axis]. Sb. nauch. tr. PGASA - Coll. scientific. ar. PSAEA, Vol. 29. P. 98-101 [in Russian].
3. Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruksii [Concrete and reinforced concrete structures]. (2003). SNB 5.03.01-02*. Minsk, 139 p [in Russian].
4. Bosakov, S.V. (2002) Sticheskie raschety plit na uprugom osnovanii [Static calculations of plates on elastic foundation]. Minsk: BNTU, 128 p [in Russian].
5. Semenyuk, S.D., Moskalkova Yu.G. & Bosakov S.V. (2015). Raschet nesuschey sposobnosti zhelezobetonnykh konstruksiy, rabotayuschih na izgib s krucheniem [Calculation of bearing capacity of reinforced concrete structures, working in bending and torsion]. Resursoekonomli materiali, konstruksii, budivli ta sporudi [Resource materials, structures, buildings and constructions: collection of scientific papers]. Zbirnik naukovykh prats. [Collection of scientific papers]. Rivne: NUVHP. Vol. 30. 263-270 [in Russian].
6. Semenyuk, S.D. & Kumashev R.V. (2016). Sticheskiy raschet zhelezobetonnykh plit dorozhnogo pokrytiya na uprugom osnovanii [Static analysis of reinforced concrete slabs of pavement on elastic foundation]. Perspektivnyye napravleniya innovatsionnogo razvitiya stroitelstva i podgotovki inzhenernykh kadrov [Perspective directions of innovative development of the construction and training of engineers]. Grodno., Gr GU im. Ya. Kupalyi, 163-170 [in Russian].
7. ТКП 45-3.05-244-2011(02250). (2012). Avtomobilnyye dorogi. Dorozhnyye odezhdyy zhestkogo tipa. Stroitelnyye normy proektirovaniya [Car roads. Pavement hard type. Building design standards]. Minsk, 60 p.
8. Semenyuk, S.D. (2003). Zhelezobetonnyye prostranstvennyye fundamenty zhilykh i grazhdanskiykh zdaniy na neravnomerno deformirovannom osnovanii [Concrete foundations spatial residential and civic buildings on the basis of non-uniformly deformed]. Mogilev: Belorussko-Rossiyskiy universitet, 269 p [in Russian].
9. Еврокод 2 (2015). Proektirovanie zhelezobetonnykh konstruksiy [Design of concrete structures]. Chast 1-1. Obschie pravila i pravila dlya zdaniy. [Part 1-1. General rules and rules for buildings]: ТКП EN 1992-1-1-2009* from 01t January 2010. Minsk: Minstroyarhitekturyi RB, 206 s [in Russian].
10. Semenyuk, S.D. (2001). K opredeleniyu modulya uprugosti i uprugoplasticheskikh harakteristik betona pri kratkovremennom tsentralnom szhatii [Determination of modulus of elasticity and elastic-plastic characteristics of concrete under short central compression]. Vestnik BGTU. #1. P. 40-45 [in Russian].
11. Semenyuk, S.D., Zezyulin A.V. & Semenyuk E.Ya. (2015). Raschet zhelezobetonnykh balok pryamougolnogo secheniya pri sovместном vozdeystvii poperechnykh sil, krutyaschiykh i izgibayuschiykh momentov [Calculation of reinforced concrete rectangular beams under the combined action of shear forces, torsional and bending moments]. Problemyi sovremennogo betona i zhelezobetona [Problems of modern concrete and reinforced concrete]. Sb. nauch. tr. In-t Bel NIIS [Col. of scient. works In-t Bel NIIS]. Minsk. Vol. 7, 133-151 [in Russian].