

doi: 10.5862/MCE.59.4

Напряженно-деформированное состояние дорожных плит в процессе производства и эксплуатации в условиях Западной Сибири

Stress and strain state of road slabs during production and use in the Western Siberia conditions

*Д-р техн. наук, профессор В.В. Бабков,
аспирант Р.А. Юмагулов,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет, г. Уфа, Россия
инженер Р.С. Кильдибаев,
ООО «Георекон», г. Уфа, Россия*

*V.V. Babkov,
R.A. Yumagulov,
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa,
Russia
R.S. Kildibaev,
Georekon JSC, Ufa, Russia*

Ключевые слова: дорожные плиты; дорожная
одежда жесткого типа; строительство дорог

Key words: road slabs; rigid road revetment; road
construction

Аннотация. В строительстве автомобильных дорог в сложных гидрогеологических и климатических условиях Западной Сибири используются сборные железобетонные дорожные плиты. За более чем полувековой период эксплуатации они доказали свои достоинства и в настоящее время продолжают пользоваться большим спросом. В связи с этим задача развития дорожной сети в регионах Западной Сибири и осваиваемых районах Крайнего Севера с покрытием из сборных железобетонных плит остается актуальной. Дорожные железобетонные преднапряженные плиты ПДН, как показал многолетний опыт их производства и эксплуатации, подвержены трещинообразованию уже на этапе заводского изготовления. Для исследования причин образования трещин выполнен анализ напряженно-деформированного состояния дорожных плит в программно-вычислительном комплексе ANSYS 14.0. Выявлено, что существующая схема расположения рабочей напрягаемой арматуры по действующей типовой серии 3.503.1–91 (вып. 1) способствует развитию поперечных напряжений растяжения σ_{ty} в торцевой части плит и в зонах, примыкающих к ней. Возникающие растягивающие напряжения могут инициировать раскрытие продольных трещин в процессе эксплуатации в условиях многократных повторных воздействий, характерных для условий эксплуатации дорожной плиты. По результатам анализа предложено техническое решение по оптимизации армирования дорожных плит, снижающее негативное влияние растягивающих напряжений в торцевых участках плит от усилия предварительного обжатия. Оптимизация сводится к повышению дисперсности распределения напрягаемой арматуры в сечении при сохранении мощности предварительного напряжения по усилению обжатия, что приводит к снижению поперечных напряжений растяжения до приемлемого уровня.

Abstract. Precast concrete road slabs are used for auto-road construction in the severe hydrogeologic and climatic conditions of Western Siberia. The advantages of precast concrete road pavements have been proved by more than half a century of use, which is confirmed by the current steady demand for this type of product. The problem of developing the precast concrete road system in the Western Siberian and the Far North regions is therefore still a critical task. The long experience of manufacturing and using prestressed concrete road slabs showed that they are at risk of crack formation not only when the road pavement is used but also at the manufacturing stage. To explore the reason of crack formation, stress and strain state analysis of road slabs was performed using the ANSYS 14.0 software. It was revealed that the existing prestressed reinforcement layout of the functional standard series enables the development of transverse tensile stress σ_{ty} in slab ends and adjoining parts.

The occurring tensile stress can initiate longitudinal cracks in operation by multiple repeated exposure typical for the road slab usage conditions. Based on the results of the analysis, a technical solution optimizing road slab reinforcement was suggested to reduce the detrimental effect of tensile stress in slab ends from the prestressing force. The optimization involves increasing the distribution dispersability of tensile reinforcement at cross-sections by the prestressing force without sacrificing its prestress capacity, resulting in reducing tensile transverse stress to acceptable levels.

Введение

Начиная с 60-х годов прошлого столетия при строительстве автомобильных дорог в сложных гидрогеологических и климатических условиях Западной Сибири используются сборные железобетонные дорожные плиты. В основном строительство ведется нефтегазодобывающими компаниями для освоения месторождений, а также развития автотранспортного сообщения между населенными пунктами в регионах присутствия. Следует отметить, что около 80 % запасов углеводородного сырья Российской Федерации залегает на территориях, где строительство дорог должно производиться с применением дорожных одежд жесткого типа, и наиболее оправданным является вариант использования сборных железобетонных плит [1]. Однако многолетний опыт их производства и эксплуатации выявил проблемы, связанные с пониженной трещиностойкостью уже на этапе заводского изготовления. Проблемы трещиностойкости и долговечности дорожных железобетонных плит изучались в ряде исследований, затрагивавших влияние температурных деформаций, усадочных деформаций, которые возникают при твердении бетона вследствие потери влаги [2, 3]. Имеются исследования трещиностойкости зрелого тяжелого бетона, более или менее завершившего структурообразование [3–7], а также отработавшего значительный срок эксплуатации [3, 8, 9].

В данной статье представлены результаты исследования влияния предварительного напряжения арматуры на трещиностойкость дорожных плит в процессе изготовления и эксплуатации. Для исследования причин образования трещин выполнен анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) дорожных плит в программно-вычислительном комплексе ANSYS 14.0.

Обзор литературы по данному вопросу показал, что исследования НДС железобетонных элементов проводились многими авторами [7, 10–14], но исследований НДС конкретно дорожных плит, в том числе на стадии заводского изготовления, в данных публикациях не представлено. Установлено, что существующая схема расположения рабочей напрягаемой арматуры в действующей типовой серии 3.503.1–91 вызывает возникновение и развитие поперечных напряжений растяжения σ_{ty} в торцевой части плит и зонах примыкающей к ней на всех стадиях жизненного цикла конструкции, что определяет общую недостаточную трещиностойкость. Возникающие при этом растягивающие поперечные напряжения могут инициировать образование и раскрытие продольных трещин в процессе эксплуатации в условиях циклических нагрузок от автомобильного транспорта.

По результатам анализа предложено техническое решение по оптимизации армирования дорожных плит, снижающее негативное влияние поперечных растягивающих напряжений σ_{ty} в торцевых участках плит от усилия предварительного обжатия. Одновременно повышается несущая способность конструкции, что актуально в современных условиях возросшей интенсивности автомобильных нагрузок [15].

Конструктивные решения типовых дорожных плит и вероятные причины образования трещин

Наибольшее применение в дорожных одеждах жесткого типа из сборных плит получила предварительно напряженная железобетонная плита типа ПДН размерами 6.0 x 2.0 x 0.14 м (L x B x h), разработанная на базе аэродромной плиты ПАГ-14 [16]. Отличительной особенностью плит типа ПДН относительно ПАГ-14 на момент разработки являлось уменьшенное количество рабочей арматуры по площади вследствие воздействия меньших расчетных нагрузок на покрытие автодороги [16].

Заводы железобетонных конструкций, производящие сборные железобетонные плиты для строительства автомобильных дорог в сложных гидрогеологических условиях Западной Сибири, используют действующую документацию на производство данных конструкций – альбом «Серия 3.503.1–91. Выпуск 1. Плиты. Рабочие чертежи» (Разработан: Союздорпроект Минтрасстроя. Утвержден: Минтрансстрой СССР 04.12.89. Введен в действие 01.06.90). Конструкция плиты размерами 6.0 x 2.0 x 0.14 м (L x B x h) запроектирована как преднапряженная в одном направлении ортотропная конструкция на упругом винклеровском основании с эквивалентным коэффициентом постели не менее $k = 10 \text{ кгс/см}^3$ (100 МН/м^3) и соответствующим модулем упругости основания $E = 100 \text{ МПа}$ для расчетной нормативной нагрузки 50 кН на колесо трехосного автомобиля. В расчете учтена возможность расположения на плите одного, двух и четырех колес (задней двухосной тележки автомобиля и смежных колес двух автомобилей) при коэффициенте надежности по нагрузке $\gamma_f = 1.1$ и коэффициенте динамичности $\mu = 1 + 0.2$.

Следует отметить, что в настоящее время в действующем ГОСТ Р 52748–2007 «Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения» значения нормативных нагрузок от автотранспортных средств повышены по сравнению с нагрузками, принятыми в расчет на момент освоения производства плит существующей серии. Плита ПДН запроектирована в основном варианте по рабочей напрягаемой арматуре 10 стержнями $\varnothing 12$ арматурной стали класса AV(At-V) или 10 стержнями $\varnothing 14$ арматурной стали класса AIV(At-IV) с симметричным размещением верхнего и нижнего ряда стержней по толщине плиты при расстоянии от центра стержней рабочей арматуры до края сечения 40 мм (рис. 1).

Следует отметить, что конструкция плиты с однонаправленно расположенной рабочей предварительно напряженной арматурой не соответствует требованиям п. 10.3.8 СП 63.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 52–01–2003). Несоответствие заключается в расстояниях между тремя средними стержнями этой арматуры в 540 мм, принятыми в серии. Существующее расположение не обеспечивает равномерность распределения напряжений сжатия в бетоне по ширине сечения плиты и обуславливает развитие поперечных напряжений растяжения σ_{ty} (рис. 1а). В итоге это зачастую приводит к развитию продольных трещин в железобетоне плит, которые и наблюдаются на практике на стадии заводского производства конструкций вследствие превышения расчетных сопротивлений бетона на растяжение. Блокирование поперечных растягивающих напряжений и развития продольных трещин в плите поперечной ненапрягаемой арматурой в виде стержней $\varnothing 8$ арматурной стали класса AIII на концевых участках плит с дополнительным сеточным двухрядным армированием арматурой $\varnothing 5$ класса Bp-I в пролете не достигается. При нагружении этой ненапрягаемой арматуры в поперечном направлении на уровне ~15 % от ее расчетных сопротивлений исчерпывается предельная растяжимость бетона.

$$(\varepsilon_{bult} \approx 10 \cdot 10^{-5}):$$

$$\sigma_s = \varepsilon'_b * E_s = 10 \cdot 10^{-5} * 2 \cdot 10^5 \approx 20 \text{ МПа}$$

Здесь $E_s \approx 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ – модуль упругости арматурной стали.

Предельно допустимое расстояние между стержнями продольной рабочей арматуры согласно требованиям п. 10.3.8 СП 63.13330.2012 должно составлять не более 200 мм.

Образование продольных трещин при больших расстояниях между стержнями рабочей арматуры возможно уже на стадии отпуска натяжения арматуры. При этом появление начальных трещин на этой стадии наиболее вероятно на торцах в средних сечениях между наиболее удаленными стержнями рабочего армирования. Еще более вероятно появление указанных трещин на стадии съема плиты из формы в случае формования ее лицевой поверхностью вниз. При этом указанные трещины могут выходить на лицевую поверхность во время съема плиты и ее такелажа со сменой ориентации лицевой поверхности вверх в силу того, что на этой стадии происходит сложение растягивающих напряжений, формирующихся при отпуске натяжения арматуры и изгибе от собственного веса плиты (рис. 1б, в).

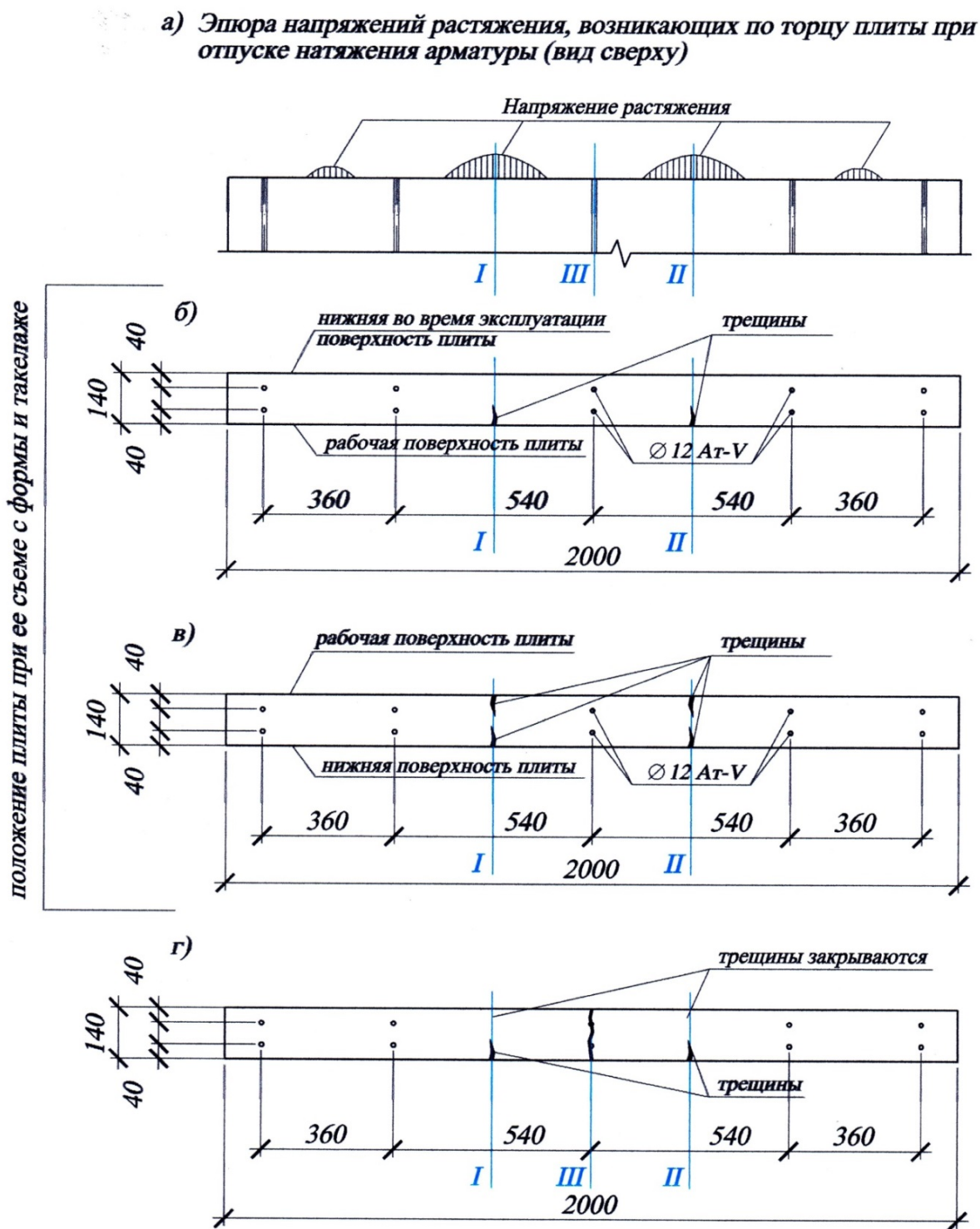


Рисунок 1. Положения и напряженное состояние плиты при съеме с опалубочной формы: а) напряжения растяжения по торцу плиты при отпуске натяжения арматуры; б) 1 цикл съема с рабочей поверхностью плиты «снизу»; в) 2 цикл с поворотом плиты на 180° и рабочей поверхностью «сверху»; г) возникновение сквозных трещин по оси плиты после длительной эксплуатации в дороге

Анализ напряженно-деформированного состояния типовых дорожных плит

Описанные выше определения наиболее опасных мест возникновения трещин выполнены с использованием комплекса ANSYS 14.0 в поле и в двух характерных сечениях: по торцу плиты (линии А–А, В–В) и на расстоянии 0.6 м от торца (линии С–С, D–D) (рис. 2, рис. 2.1).

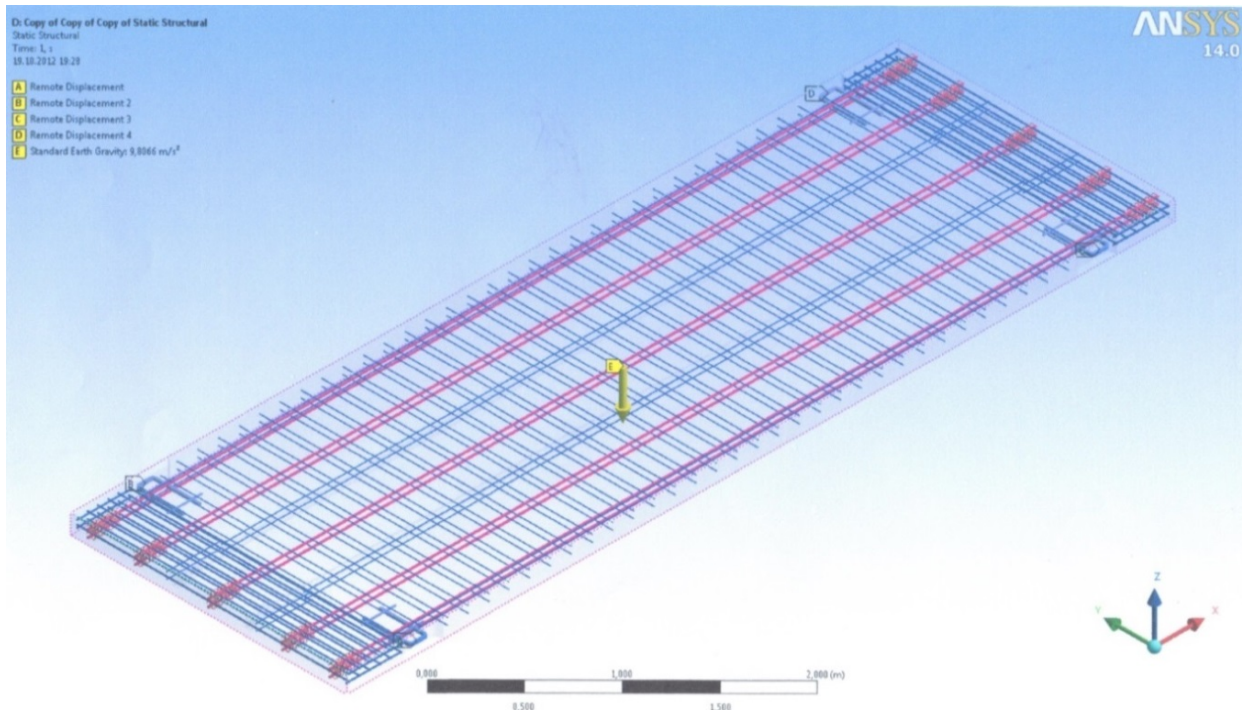


Рисунок 2. Армирование и расчетная модель плиты ПДН, производимой по действующей документации

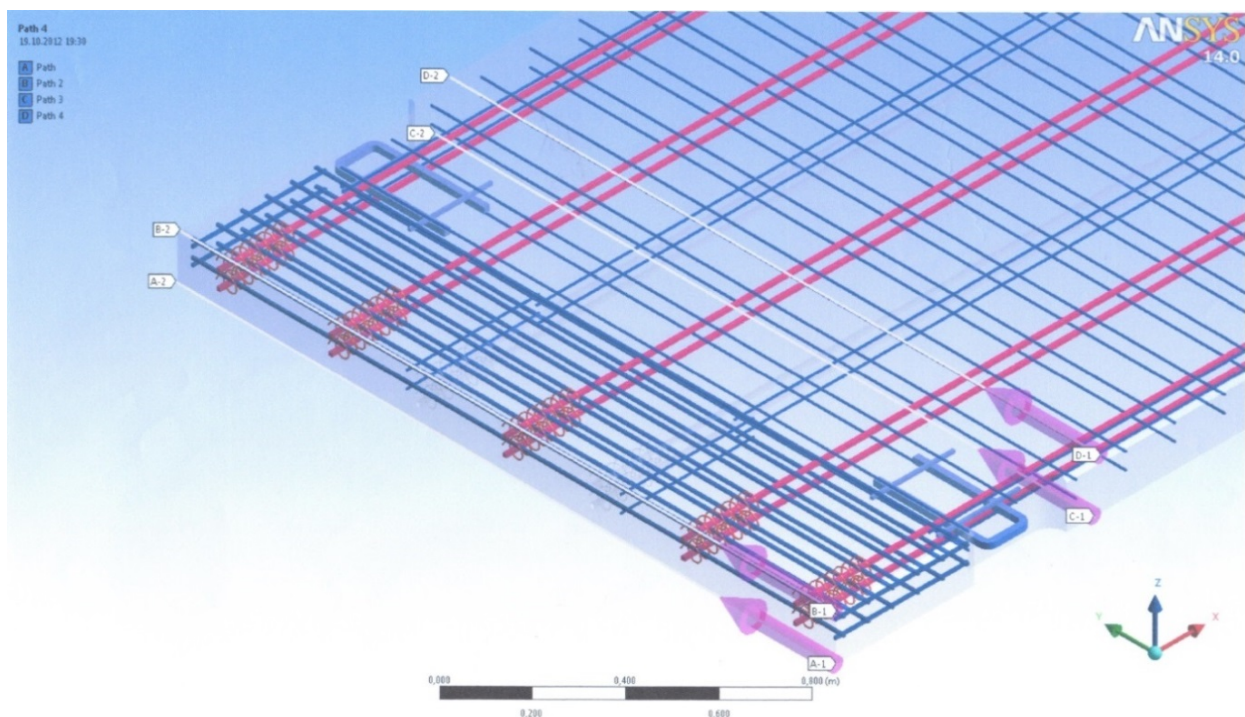


Рисунок 2.1. Армирование и расчетная модель плиты ПДН, производимой по действующей документации (увеличенный вид армирования торцевой части)

Babkov V.V., Yumagulov R.A., Kildibaev R.S. Stress and strain state of road slabs during production and use in the Western Siberia conditions

Математическое моделирование работы железобетонной конструкции основано на методе конечных элементов. Решение задачи в нелинейной постановке осуществлялось методом Ньютона – Рафсона. Для описания процесса разрушения хрупких материалов использовалась модель Виллама – Варнке [17], тип используемого конечного элемента 65. Для решения задачи были приняты следующие допущения:

- 1) все элементы конструкции связаны неразрывно;
- 2) при любых деформациях сохраняется структурная целостность элементов конструкции;
- 3) разрушение бетона приводит к образованию блочной системы, которая под внешними воздействиями деформируется как целое структурное образование, то есть разрушенный материал находится в консолидированном состоянии.

На рисунке 3 приведены эпюры растягивающих нормальных напряжений σ_{ty} для стадии нагружения плиты «отпуск натяжения арматуры + нагрузка на стадии подъема плиты с поддона за 4 монтажные петли» в двух названных сечениях. Линии В и Д соответствуют прогибу плиты и дополнительному пригрузу напряжений растяжения σ_{ty} нижней поверхности плиты; линии А и С – противоположной поверхности с частичной разгрузкой поверхности по напряжениям σ_{ty} от собственного веса плиты.

Картина НДС отражает значительную перегрузку плиты по растягивающим напряжениям σ_{ty} на участках между удаленными в средней части плиты стержнями с уровнем нагружения на осевое растяжение $\sigma_{ty} = 3$ МПа, что в 1.5 раза превышает предел прочности бетона класса В27.5 на растяжение $\sigma_{t,ult}$ (СП 52–101–03):

$$\sigma_{t,ult} = R_{bt,n} / (1 + \chi_y) = 1.70 / (1 + 1.64 * 0.135) = 2.18 \text{ МПа}$$

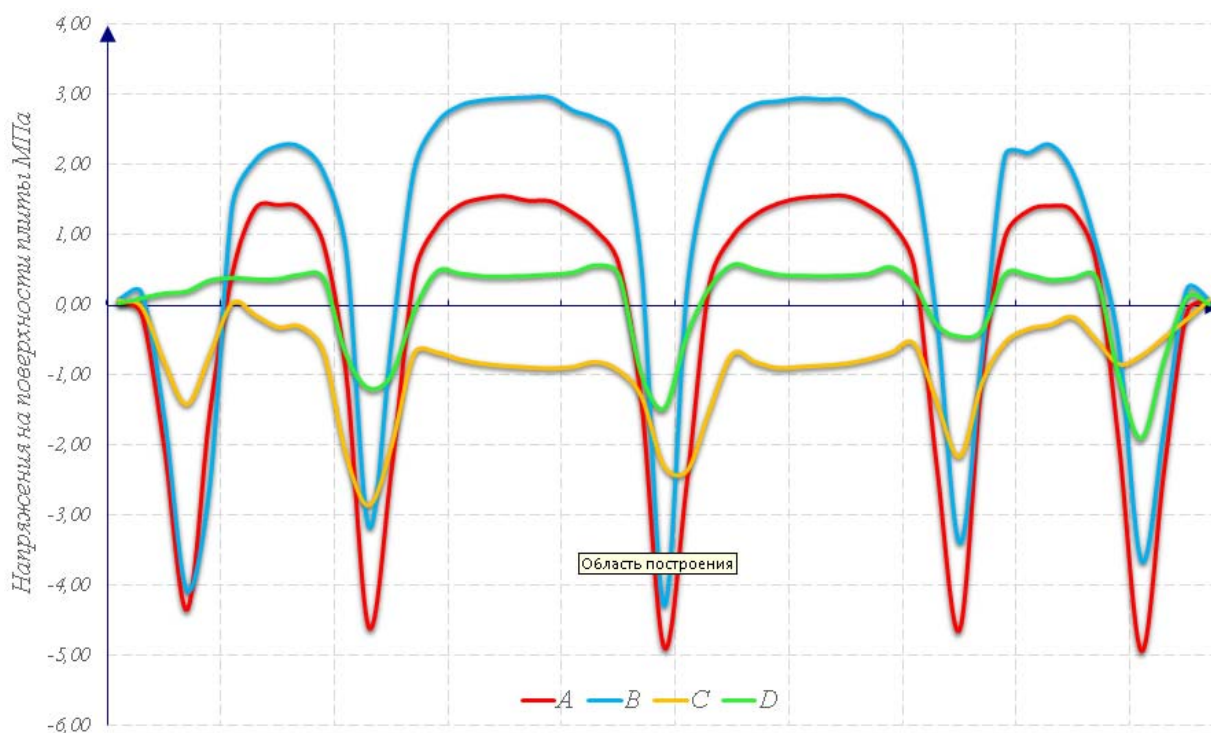


Рисунок 3. Напряженное состояние торца плиты и сечения на расстоянии 0.6 м от торца по напряжениям σ_y

При расчете в комплексе ANSYS 14.0 модуль упругопластичности бетона принят для непродолжительного действия нагрузки с учетом коэффициента упругопластических деформаций $\nu = 0.45$ (табл. 35 СНиП 2.03.04–84*). Анализ НДС указывает на то, что доля напряжений растяжения при изгибе плиты от собственного веса составляет $\approx 20\%$ полных напряжений, включая возникающие при отпуске натяжения арматуры. Максимальные напряжения растяжения по торцу плиты между 1 и 2 предварительно напряженными стержнями близки к пределу прочности бетона, что подтверждается в реальности отсутствием трещин в этих зонах на стадии изготовления плиты. Таким образом, анализ НДС, выполненный с учетом упругопластического состояния бетона, подтверждает высокую вероятность образования трещин на торцах плиты на стадии ее заводского изготовления и такелажа.

Стоит обратить внимание на то, что в сечении плиты уже на расстоянии 0.6 м от торца напряжение растяжения σ_{ty} практически обнуляется или даже меняет знак на сжатие (линии С, D на рисунке 3). Умеренное растяжение бетона в этом сечении связано исключительно с прогибом плиты от собственного веса (линия D на рисунке 3) при такелаже в одном из двух положений и не достигает предела прочности для принятого класса бетона.

Оптимизация армирования дорожных плит

В целях снижения опасных напряжений предложено два варианта решений. Первый вариант основан на апробации усиления плиты введением в ослабленные сечения I-I и II-II в действующем проекте спаренных ненапряженных стержней $\varnothing 12$ мм арматурной стали класса АIII. Второй – на введении в проблемные сечения I-I и II-II дополнительно сдвоенных стержней напрягаемой арматуры $\varnothing 12$ мм арматурной стали класса Ат-V, что в некоторой степени улучшает схему армирования плиты в свете требований п. 10.3.8 СП 63.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 52–01–2003) по размещению продольных стержней рабочей арматуры по ширине плиты с учетом ее толщины (рис. 4).

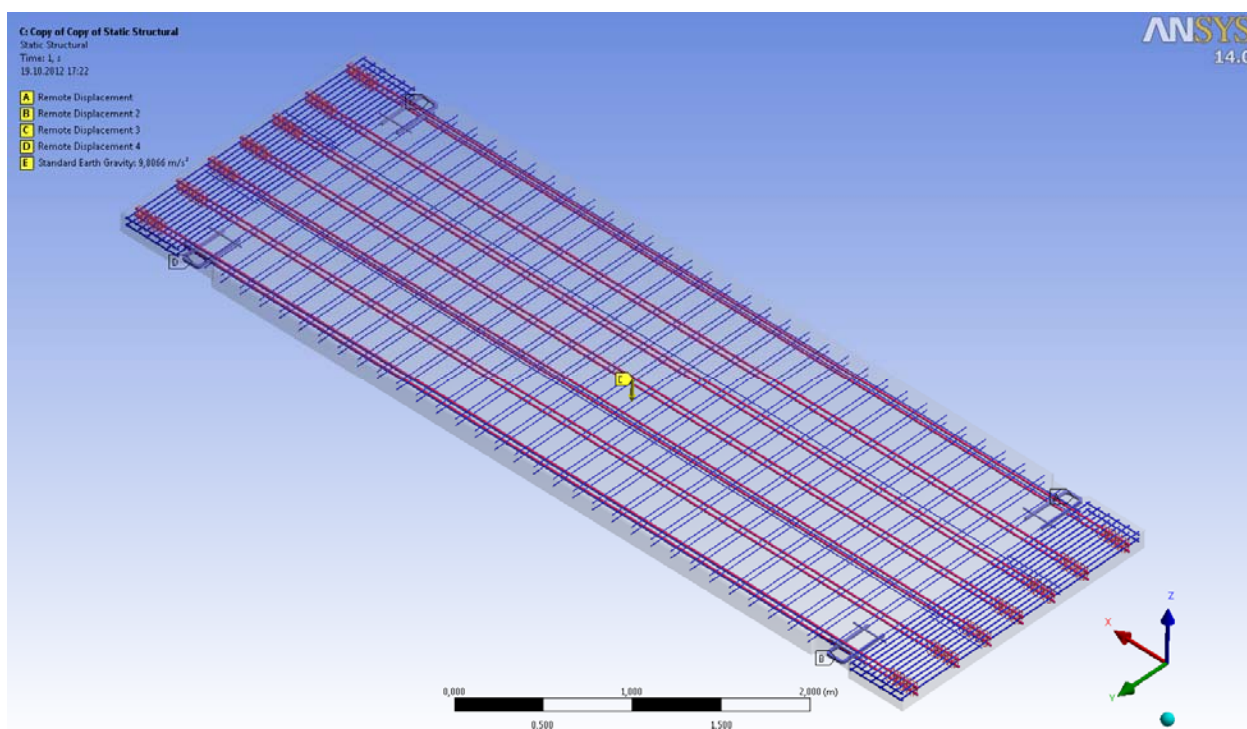


Рисунок 4. Армирование и расчетная модель плиты с рациональным армированием

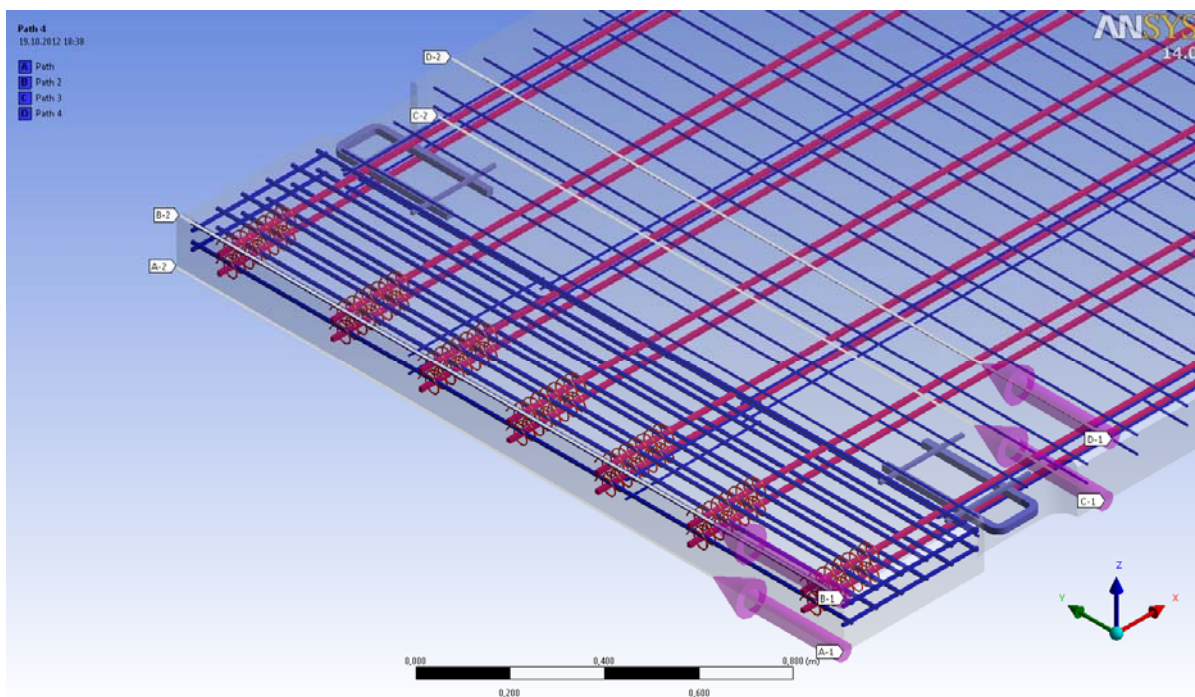


Рисунок 4.1. Армирование и расчетная модель плиты с рациональным армированием (увеличенный вид армирования торцевой части)

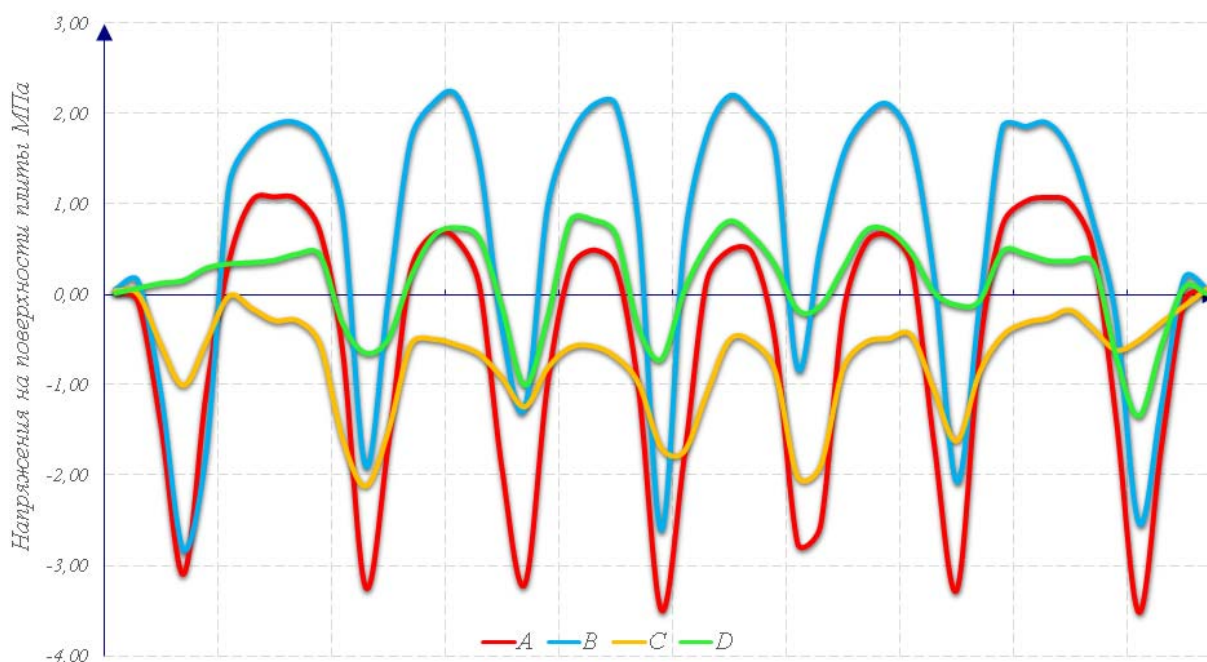


Рисунок 5. Напряженное состояние плиты с рациональным размещением рабочей арматуры

Анализ НДС плиты ПДН в программном комплексе ANSYS 14.0 показал, что повышение дисперсности распределения напрягаемой арматуры в сечении (увеличение числа стержней продольного армирования) при сохранении мощности предварительного напряжения по усилию обжатия снизило значения поперечных напряжений растяжения до ~ 2.0 МПа (рис. 5), что находится в пределах прочности на осевое растяжение для бетона данного класса. В данном случае возможны и другие пути повышения трещиностойкости конструкций плит, к примеру, использование стальной фибры [18–21], но, учитывая возросшие нагрузки от автомобильного транспорта и существующую технологию изготовления плит ПДН, следует признать повышение дисперсности стержневого армирования оптимальным решением.

Таким образом, можно ожидать, что данный вариант армирования в виде 14 стержней $\varnothing 12$ мм арматурной стали класса Ат-V при сохранении количества ненапрягаемой арматуры по серии обеспечит трещиностойкость плиты на стадии ее изготовления и одновременно повысит несущую способность и трещиностойкость при эксплуатации.

Некоторые предложения по улучшению условий эксплуатации старых дорожных плит на действующих дорогах

В настоящее время при эксплуатации плит с проектным армированием в составе дороги напряжения, возникающие при отпуске натяжения арматуры на бетон и такелаже плиты, будут складываться с силовыми напряжениями от автомобильной нагрузки. При этом наряду с уязвимыми в силу удаленности от зон обжатия сечениями I-I и II-II опасным становится сечение III-III (рис. 1г) по оси плиты. При двухполосном встречном движении ось средней из трех двухметровых по ширине плит в составе дороги будет нагружена вдвое интенсивнее по числу циклов нагружения и по абсолютной нагрузке по сравнению с крайними.

Средняя плита, в связи с этим, окажется расколота сквозной трещиной III-III (рис. 1г) с последующей работой двух практически самостоятельных блоков шириной около 1 м, связанных между собой поперечной ненапрягаемой арматурой в виде стержней $\varnothing 8$ АIII на крайних участках и двух сеток $\varnothing 5$ Вр-I с шагом проволочек 150 мм в пролете (рис. 1г).

Такие пары конструкций оказываются работоспособными в реальных условиях, что и наблюдается на дорогах Западной Сибири. Полезной при этом будет обработка трещин III-III в плитах одним из вариантов жидкой полимеризующейся гидроизоляции в целях защиты рабочей арматуры от коррозии. Может быть рекомендована «Славянка изоляционная», представляющая собой однокомпонентный битумно-полимерный состав. Готовый к применению материал обладает высокими адгезионными свойствами, образует эластичное нетоксичное покрытие без запаха, после высыхания мастичная пленка устойчива к ударным нагрузкам как при положительных, так и при отрицательных температурах. Альтернативный вариант – мастика или герметик марки Ижора (Ижора МБР-Г-90). Данные материалы производятся в Ленинградской области.

Выводы

1. Анализ напряженно-деформированного состояния позволил выявить зоны образования трещин в торцевой части типовых дорожных плит в связи с неравномерным распределением напряжений сжатия по ширине сечения плиты после отпуска усилия обжатия на бетон и сопутствующих им опасных поперечных напряжений растяжения σ_{ty} .

2. Существующее расположение стержней рабочей напрягаемой арматуры в действующей типовой серии не обеспечивает равномерность распределения напряжений сжатия в бетоне по ширине сечения плиты и не отвечает современным требованиям нормативных документов. Это приводит к развитию поперечных напряжений растяжения σ_{ty} , значительно превышающих прочность бетона на осевое растяжение.

3. С целью снижения поперечных растягивающих напряжений при торцевых зонах плит предложено повышение дисперсности распределения напрягаемой рабочей стержневой арматуры в сечении плиты при сохранении мощности предварительного напряжения по усилию обжатия. Это решение приводит к снижению поперечных растягивающих напряжений в торцевой части плиты до 2.0 МПа, что находится в пределах прочности на осевое растяжение для бетона проектного класса.

4. Данное решение актуально в современных условиях эксплуатации дорог, в том числе в связи с увеличением грузоподъемности транспорта и интенсивности автомобильных перевозок. Применение плит с увеличенным с 5 до 7 рядов рабочим армированием повлечет за собой повышение эксплуатационного ресурса и долговечности сборных дорожных покрытий.

Литература

1. Промышленно-строительное обозрение №123 март 2010. Технологии и материалы для транспортного строительства. Дороги без дураков [Электронный ресурс]. URL: http://www.stroy puls.ru/vipusk/detail.php?article_id=31319 (дата обращения 15.02.2014).
2. Левицкий Е.Ф., Чернигов В.А. Бетонные покрытия автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1988. 288 с.
3. Johnston D. P., Surdahl R.W. Influence of Mixture Design and Environmental Factors on Continuously Reinforced Concrete Pavement Cracking // Journal of the Transportation Research Board. 2007. №2020. Pp. 83–88.
4. Полак А.Ф., Бабков В.В., Андреева Е.П. Твердение минеральных вяжущих веществ. Уфа: Башкиргоиздат, 1990. 215 с.
5. Дибров Г.Д., Фоменко В.К. Природа возникновения внутренних напряжений в дисперсных структурах // Тезисы докладов и сообщения Всесоюзного совещания «Гидратация и твердение вяжущих». Уфа, 1978. С. 251–267.
6. Курбатов В.Л. Влияние воздухоовлечения на трещиностойкость дорожных бетонов // Сборник статей по материалам XXIX международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике». №12 (25). Новосибирск: СибАК, 2013. 208 с.
7. Ахметзянов Ф.Х., Радайкин О.В. К определению зависимостей параметров поверхностных трещин в бетонных объемных элементах // Вестник ТГАСУ. 2008. №1. С. 65–73.
8. Янковский Л.В. К вопросу оценки стойкости бетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия климата // Вестник ТГАСУ. 2013. №1. С. 1250–138.
9. Носов В.П. Цементобетонные покрытия автомобильных дорог. Прогнозирование повреждений на основе математического моделирования. М.: МАДИ, 2013. 227 с.
10. Бартоломей М.Л., Труфанов Н.А. О применении пакета ANSYS для исследования деформирования здания с учетом трещинообразования // Вестник ПГТУ. 2009. №1. С. 15–21.
11. Редикутьцев Е.А. Численное исследование поведения изгибаемых железобетонных элементов при помощи программного комплекса ANSYS // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. 2009. №2. С. 84–87.
12. Демьянушко И.В., Стаин В.М., Стаин А.В. Применение метода конечных элементов для расчета бетонной плиты жесткого дорожного покрытия // Сборник научных трудов «Вопросы строительной механики и надежности машин и конструкций». М., 2012. С. 5–15.
13. Dahmani L., Khenane A., Kacia S. Crack identification in reinforced concrete beams using Ansys Software // Strength of Materials. 2010. Vol. 42. №2. Pp. 141–153.
14. Fanning P. Nonlinear Models of Reinforced and Post-tensioned Concrete Beams // Electronic Journal of Structural Engineering. 2001. №2. Pp. 111–119.
15. Бабков В.В., Селиверстов С.Н., Юмагулов Р.А. Опыт производства и применения железобетонных преднапряженных плит серии ПДН Холдинговой компании «Башбетон» в строительстве дорог Западной Сибири // Строительные материалы. 2014. №3. С. 15–17.
16. Глушков Г.И., Бабков В.Ф., Медников И.А. и др. Жесткие покрытия аэродромов и автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1987. 255 с.

References

1. *Promyshlennno-stroitelnoye obozreniye №123 mart 2010. Tekhnologii i materialy dlya transportnogo stroitelstva. Dorogi bez durakov* [Technologies and materials for vehicle construction. Roads without fools] [online]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.stroy puls.ru/vipusk/detail.php?article_id=31319 (accessed: 15.02.2014). (rus)
2. Levitskiy Ye.F., Chernigov V.A. *Betonnyye pokrytiya avtomobilnykh dorog* [Concrete pavement of highways]. Moscow. Transport. 1988. 288 p. (rus)
3. Johnston D. P., Surdahl R.W. Influence of Mixture Design and Environmental Factors on Continuously Reinforced Concrete Pavement Cracking. *Journal of the Transportation Research Board*. 2007. No. 2020 of the National Academics, Washington, D.C. Pp 83-88.
4. Polak A.F., Babkov V.V., Andreyeva Ye.P. *Tverdeniye mineralnykh vyazhushchikh veshchestv* [The hardening of mineral binders]. Ufa. Bashkniogoizdat. 1990. 215 p. (rus)
5. Dibrov G.D., Fomenko V.K. Priroda vozniknoveniya vnutrennikh napryazheniy v dispersnykh strukturakh [The origin of internal stress in dispersed structures]. *Tezisy dokladov i soobshcheniya Vsesoyuznogo soveshchaniya «Gidratatsiya i tverdeniye vyazhushchikh»* [Theses of reports all-Union meeting "Hydration and hardening binders"]. Ufa. 1978. Pp. 251–267. (rus)
6. Kurbatov V.L. Vliyaniye vozdukhovovlecheniya na treshchinostoykost dorozhnykh betonov [The influence of air entrainment on the concrete road crack]. *Sbornik statey po materialam XXIX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Tekhnicheskiye nauki – ot teorii k praktike»* [A collection of articles on materials of the XXIX international scientific-practical conference "Technical Sciences – from theory to practice"]. No. 12 (25). Novosibirsk. SibAK. 2013. 208 p. (rus)
7. Akhmetzyanov F.Kh., Radaykin O.V. K opredeleniyu zavisimostey parametrov poverkhnostnykh treshchin v betonnykh obyemnykh elementakh [To the definition of dependencies between parameters of surface cracks in concrete volume elements]. *Vestnik of TSUAB*. 2008. No. 1. Pp. 65–73. (rus)
8. Yankovskiy L.V. K voprosu otsenki stoykosti betonnykh konstruksiy, ekspluatiruyushchikhsya v usloviyakh vozddeystviya klimata [To the question of assessing the durability of concrete structures operated in the conditions of impact of climate change]. *Vestnik of TSUAB*. No. 1. 2013. Pp. 125–138. (rus)
9. Nosov V.P. *Tsementnobetonnyye pokrytiya avtomobilnykh dorog. Prognozirovaniye povrezhdeniy na osnove matematicheskogo modelirovaniya* [Concrete pavement of roads. Prediction of damages on the basis of mathematical modeling]. Moscow. MADI. 2013. 227 p. (rus)
10. Bartolomey M.L., Trufanov N.A. O primeneniye paketa ANSYS dlya issledovaniya deformirovaniya zdaniya s uchedom treshchينوobrazovaniya [About application of ANSYS to study the deformation of a building with consideration of cracking]. *Vestnik PGTU*. 2009. No. 1. Pp. 15–21. (rus)
11. Redikultsev Ye.A. Chislennoye issledovaniye povedeniya izgibayemykh zhelezobetonnykh elementov pri pomoshchi programmnogo kompleksa ANSYS [Numerical study of bending behavior of reinforced concrete elements using the software ANSYS]. *Akademicheskij vestnik URALNIIPROEKT RAASN*. 2009. No. 2. Pp. 84–87. (rus)
12. Demyanushko I.V., Stain V.M., Stain A.V. Primeneniye metoda konechnykh elementov dlya rascheta betonnoy plity zhestkogo dorozhnogo pokrytiya [The finite element method is used to calculate the concrete slabs of rigid pavement]. *Sbornik nauchnykh trudov «Voprosy stroitel'noy mekhaniki i nadezhnosti mashin i konstruksiy»* [Problems of structural mechanics and machines and structures reliability:

Бабков В.В., Юмагулов Р.А., Кильдибаев Р.С. Напряженно-деформированное состояние дорожных плит в процессе производства и эксплуатации в условиях Западной Сибири

17. Willam K.J. Constitutive Model for Triaxial Behavior of Concrete // *Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering*. 1975. №9. Pp. 174–191.
18. Graeff A.G., Pilakontas K., Neocleous K., Maria Vania N.N. Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres // *Engineering Structures*. 2012. Vol. 45. Pp. 385–395.
19. Nobilia A., Lanzonia L., Tarantino A.M. Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47. Pp. 888–895.
20. Lanzonia L., Nobilib A., Tarantino A. M. Performance evaluation of a polypropylene-based draw-wired fibre for concrete structures // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 28. Pp. 798–806.
21. Zhang T., Xu Y., Lin Z. The Application of Fiber Reinforced Concrete in Cement Concrete Pavement // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 634–638. Pp. 2094–2097.
- Collection of papers]. 2012. Pp. 5–15. (rus)
13. Dahmani L., Khennane A., Kacia S. Crack identification in reinforced concrete beams using Ansys Software. *Strength of Materials*. 2010. Vol. 42. No. 2. Pp. 141–153.
14. Fanning P. Nonlinear Models of Reinforced and Post-tensioned Concrete Beams. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2001. No. 2. Pp. 111–119.
15. Babkov V.V., Seliverstov S.N., Yumagulov R.A. Opyt proizvodstva i primeneniya zhelezobetonnykh prednapryazhennykh plit serii PDN Kholdingovoy kompanii «Bashbeton» v stroitelstve dorog Zapadnoy Sibiri [Experience in the production and use of prestressed concrete slabs PD series of the Holding company "Bashbeton" in the construction of roads in Western Siberia]. *Construction materials*. 2014. No. 3. Pp. 15–17. (rus)
16. Glushkov G.I., Babkov V.F., Mednikov I.A. *Zhestkiye pokrytiya aerodromov i avtomobilnykh dorog* [Rigid pavements of airfields and roads]. Moscow. Transport. 1987. 255 p. (rus)
17. Willam K.J. Constitutive Model for Triaxial Behavior of Concrete. *Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering*. 1975. No. 9. Pp. 174–191.
18. Graeff A.G., Pilakontas K., Neocleous K., Maria Vania N.N. Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres. *Engineering Structures*. 2012. Vol. 45. Pp. 385–395.
19. Nobilia A., Lanzonia L., Tarantino A. M. Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47. Pp. 888–895.
20. Lanzonia L., Nobilib A., Tarantino A. M. Performance evaluation of a polypropylene-based draw-wired fibre for concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 28. Pp. 798–806.
21. Zhang T., Xu Y., Lin Z. The Application of Fiber Reinforced Concrete in Cement Concrete Pavement. *Advanced Materials Research*. 2013. Vols 634–638. Pp. 2094–2097.

Вадим Васильевич Бабков,
+79279570880; эл. почта:
babkov.ugntu@gmail.com

Руфат Айратович Юмагулов,
+79279570880; эл. почта:
yumagulovra@gmail.com

Ринат Салаватович Кильдибаев,
+79196003057; эл. почта: rbstroi@mail.ru

Vadim V. Babkov,
+79279570880; babkov.ugntu@gmail.com

Rufat A. Yumagulov,
+79279570880; yumagulovra@gmail.com

Rinat S. Kildibaev,
+79196003057 rbstroi@mail.ru

© Бабков В.В., Юмагулов Р.А., Кильдибаев Р.С., 2015