

**М.А. Кисель**

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

## **ВЛИЯНИЕ УСТАЛОСТНОЙ НАГРУЗКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫНОСЛИВОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ РАСЧЕТЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ**

Рассмотрены такие явления, как усталость и выносливость металлических мостов, а также причины возникновения усталости, механизм возникновения усталостных трещин, методы ее определения в лабораторных условиях. Напряжения во времени могут изменяться по периодическому закону или носить случайный характер, поэтому изложен периодический закон изменений напряжений, так как сам закон изменения напряжений во времени не оказывает существенного влияния на выносливость конструкции. На основании этого рассмотрены понятия, которые включает в себя периодический закон изменения напряжений, а также такие понятия, как абсолютный предел выносливости и предел относительной выносливости. Также подробно проанализирован вопрос остаточных напряжений, которые возникают в металлических элементах, в том числе, что немаловажно, после сварки. Представлена зависимость распределения таких напряжений в элементе от расстояния удаления сварного шва. Описаны способы определения усталостной нагрузки, которые предлагаются в ТКП EN 1993-2-2009, при проектировании стальных железнодорожных мостов, что обусловлено переходом Республики Беларусь на европейские нормы проектирования, так называемые «Еврокоды». В связи с этим необходимо проводить работу по адаптации данных норм проектирования к условиям проектирования стальных железнодорожных мостов в Республике Беларусь. В статье приведены требования, которые предъявляются к элементам железнодорожного моста при оценке сопротивления усталости в процессе проектирования сооружения. В заключение показан сравнительный анализ определения усталостных напряжений по нормам проектирования разных стран. Также рассмотрены некоторые вопросы актуальности данного расчета.

**Ключевые слова:** усталость металла, выносливость металла, методы расчета, железнодорожный мост, стальные фермы, цикл воздействия, временная нагрузка, предел выносливости.

**M.A. Kisel**

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic Belarus

## **THE INFLUENCE OF FATIGUE LOADING ENDURANCE AND DETERMINATION OF METAL IN THE CALCULATION OF RAILWAY BRIDGES**

In this article we will examine phenomena such as fatigue and endurance metal bridges. Discussed in detail the causes of fatigue, the mechanism of occurrence of fatigue cracks, methods to determine it in the laboratory. Voltage in time may vary according to the periodic law or casual in. This article will consider the periodic law of stress changes as well as changes in the law itself stresses in time has no significant effect on endurance design. Based on this, we consider the basic concepts, which includes periodic law changes stresses. In the beginning of the article will be given to concepts such as the absolute limit of endurance, and endurance limit of the relative. Also considered in detail of residual

stresses which occur in metal elements, and not least, the residual stresses which occur in metal elements after welding. The dependence of the distribution of stresses in the element on the distance remove weld. Learn how to determine the fatigue loading, which are offered in TAP EN 1993-2-2009, in the design of steel railway bridges. The reason for consideration of the matter by European standards served as the transition of the Republic of Belarus to the European design standards, so-called "Euro-codes". In this regard, it is necessary to work on the adaptation of these rules to the conditions of the design design of steel railway bridges in the Republic of Belarus in the materials of the article the requirements that apply to the elements of the railway bridge in the assessment of fatigue resistance in the process of designing structures. Finally, a comparative analysis shows the determination of a fatigue design rules for different countries. Also addressed some questions the relevance of the calculation.

**Keywords:** fatigue, endurance metal, methods of calculation, railway bridge, steel trusses, cycle impacts live load, the endurance limit.

Железнодорожные мосты с пролетными строениями из стальных ферм в настоящее время практически не разрушаются в результате потери прочности. Разрушения, связанные с потерей устойчивости элемента фермы, бывают редко. Как правило, такие ситуации связаны либо с монтажом, либо с механическими повреждениями, полученными во время эксплуатации моста от пропуска негабаритных грузовых составов или негабаритного судоходного транспорта. Зачастую разрушения мостов происходят из-за появления и развития трещин, связанных с усталостью металла. Рассмотрим некоторые причины появления усталостных трещин [1].

В течение всего срока службы моста постоянно действующая временная нагрузка от движения железнодорожного транспорта создает многократно повторяющиеся циклы воздействий на элементы стальных ферм. Элементы конструкций, испытывающие такое воздействие, подвержены развитию усталостных напряжений. Согласно правилам ТКП EN 1993-2–2009 (п. 9.1.3 (1)) все элементы железнодорожных мостов необходимо проверять на усталость металла. В отличие от пешеходных мостов или мостов, загруженных только статической нагрузкой, железнодорожные мосты в целом более подвержены усталостной нагрузке из-за высоких динамических нагрузок [1, 2].

В результате многократных изменений напряжений в некоторых несущих элементах могут возникать и развиваться трещины, которые впоследствии приводят к разрушению конструкции. Напряжения по воздействию на элементы фермы во времени бывают постоянные и переменные. При действии переменных, повторяющихся во времени напряжений в зонах их концентрации (там, где напряжения больше средних) на поверхности металла образуются микротрещины. Они постепенно развиваются, проникают в глубь металла и приводят к разрушению. Это явление – понижение несущей способности металла за

счет появления микротрещин – называют усталостью металла. Свойство металла сопротивляться усталости называют выносливостью. Напряжения во времени могут изменяться по периодическому закону или носить случайный характер. В данной статье рассмотрим только периодический закон изменений напряжений, так как сам закон изменения напряжений во времени не оказывает существенного влияния на выносливость конструкции. Вначале рассмотрим основные понятия, которые включает в себя циклическая нагрузка:

*Цикл* – замкнутая однократная смена напряжений, получающих одинаковые значения.

*Период* – время, в течение которого протекает полный цикл  $T$ .

*Частота* – число циклов в секунду. Циклы бывают *симметричными* – когда наибольшее и наименьшие напряжения равны по величине и противоположны по знаку, и *асимметричными* – возникают при неодинаковых по величине наибольших и наименьших напряжениях [3, 4].

На основе опытов установлено, что если изменяющиеся напряжения меньше некоторого значения напряжений, то металл не разрушается при сколь угодно большом количестве циклов. Это значение напряжений называется абсолютным пределом выносливости. Предел выносливости различен для разных металлов, элементов, имеющих различную форму или размеры, остаточные напряжения и т.п. Предел выносливости определяют опытным путем на пульсационных установках, где создается заданная величина нагружения, асимметрия циклов и их количество. Обычно предел выносливости определяют при симметричном цикле: это, во-первых, проще, а во-вторых, симметричный цикл наиболее опасный для образца. Для определения предела выносливости испытывают серию одинаковых образцов (не менее 10 шт.) по форме, обработке и материалу. Первый образец нагружают так, чтобы он разрушился при заведомо небольшом количестве циклов, и фиксируют их число  $N_1$ . Вторым образцом испытывают при напряжениях, меньших, чем первый, и определяют количество циклов  $N_2 > N_1$  и т.д., напряжение от образца к образцу начинают снижать до тех пор, пока образец не выдержит заданного количества циклов  $N_s$ . При этом строят график зависимости  $N$  от  $\sigma$  (рис. 1).

Пределом ограниченной выносливости называют наибольшее по абсолютной величине напряжение, которое образец выдерживает в течение заданного количества циклов [5, 6].

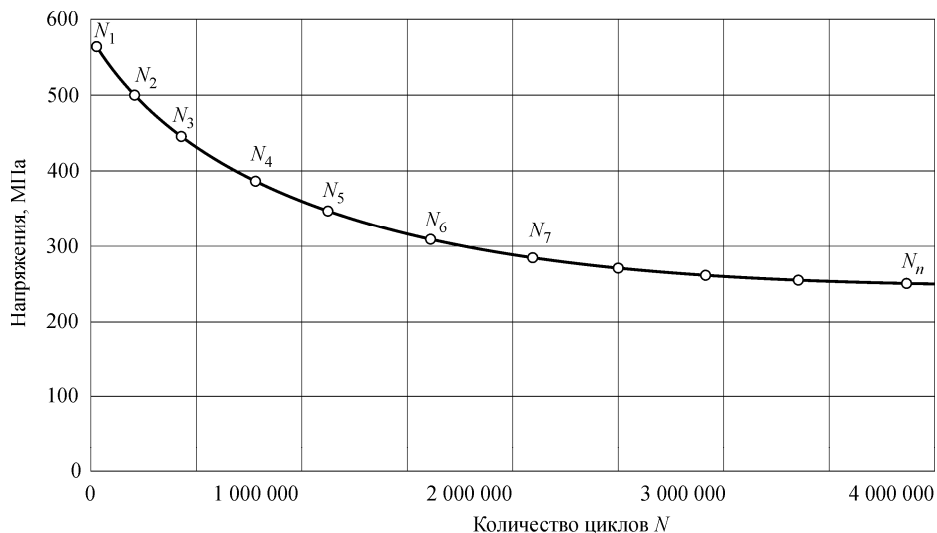


Рис. 1. Зависимость  $N$  циклов от напряжений  $\sigma$

Остаточные напряжения также влияют на усталостную прочность сварного соединения. В процессе сварки металл шва и основной металл оказываются нагретыми до высокой температуры. Свободным деформациям нагретого металла при остывании препятствует холодный металл, окружающий зону сварки. В результате сваривания металл шва и околошовная зона становятся растянутыми, а основной металл – сжатым. Несмотря на кажущуюся простоту механизма появления остаточных напряжений, теоретически установить уровень и распределение напряжений довольно сложно, так как процесс связан со структурными превращениями, текучестью, релаксацией, ползучестью и объемными измерениями [7, 8].

На основании экспериментальных и теоретических данных было установлено, что в широких пластинах продольные напряжения  $\sigma_x$  и поперечные  $\sigma_y$  достигают величин, соизмеримых с пределом текучести. С удалением от оси шва остаточные напряжения уменьшаются: поперечные  $\sigma_y$  – до нуля, а продольные  $\sigma_x$  переходят в зону сжатия, как показано на рис. 2.

Поскольку растягивающие остаточные напряжения достигают предела текучести, даже незначительные внешние воздействия вызывают в зоне швов пластическую деформацию, которая перераспределяет характер остаточных напряжений. С применением ультразвукового метода измерений остаточных напряжений появилась возможность

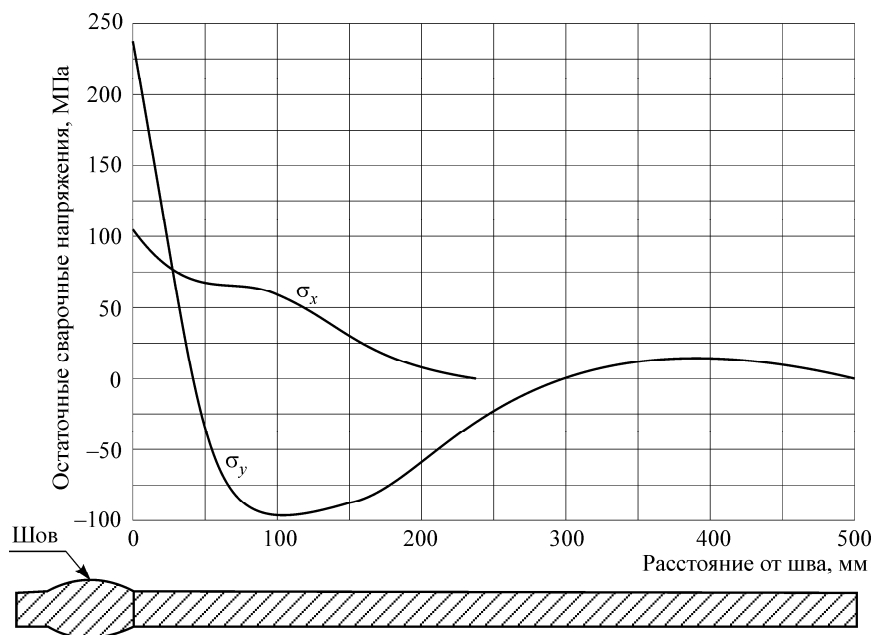


Рис. 2. Зависимость остаточных напряжений от расстояния удаления от сварного шва

оценивать изменения остаточных напряжений в процессе многократных нагружений. Исследования показали, что в многоцикловой области нагружения перераспределение происходит при первом нагружении. Остальные циклы не оказывают существенного влияния на перераспределения напряжений. Проведенные исследования влияния остаточных напряжений на усталостную прочность элемента показали, что роль остаточных напряжений существенно зависит от уровня переменных напряжений, вида соединений, асимметрии цикла. Чем выше уровень переменных напряжений, тем меньше влияние остаточных напряжений, и наоборот [9–11].

Также следует отметить, что без проведения экспериментов оценить выносливость сварных соединений не представляется возможным. Испытание сварных образцов позволяет комплексно оценивать выносливость соединений, учитывая при этом влияние концентраторов напряжений и остаточных сварочных напряжений, а также иных особенностей соединений. Поэтому все методики расчета базируются на экспериментальном материале. Но даже в том случае, если для исследуемого соединения или детали получены значения относительных пределов выносливости, воспользоваться этими значениями для

реального расчета моста не так просто. Большое отличие наблюдается при сопоставлении методики, приведенной в СНиП 2.05.03–84\*, с методиками, изложенными в нормах США и европейских нормах. Кроме того, для правильной оценки выносливости нужно точно установить величину расчетной нагрузки. Дело в том, что, в отличие от пульсационной машины, циклическая нагрузка постоянна, реальная циклическая нагрузка для железнодорожных мостов изменяется в довольно широких пределах (пассажирские поезда, грузовые поезда, состав поезда, грузоподъемность и т.д.) [9, 12].

Основной принцип расчета на усталостные нагрузки состоит в определении количества циклов воздействия на стальной элемент в определенном диапазоне напряжений. После определения количества циклов воздействия необходимо проверить способность этого элемента выдержать указанное количество циклов. Для проверки усталостной прочности стального элемента под действием циклической нагрузки можно использовать сумму Майнера:

$$\sum_i^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \leq 1,0, \quad (1)$$

где  $n_{Ei}$  – количество циклов нагружения в заданном диапазоне напряжений;  $N_{Ri}$  – количество циклов нагружения в данном диапазоне напряжений, которое приведет к усталостному разрушению элемента.

На практике такой расчет окажется весьма трудоемким, поскольку напряжения в каждом элементе моста варьируются вследствие случайного характера движения железнодорожного транспорта. Отдельные элементы железнодорожного моста можно проверить при помощи такой процедуры только зная режим воздействий. Другими словами, необходимо знать массу и количество вагонов каждого поезда, который будет проходить по каждому пути в течение всего срока службы моста, а также распределение нагрузки по колеям. Такие расчеты будут громоздкими, поскольку количество разных типов поездов, проходящих через мост в течение его срока эксплуатации, будет достаточно велико [13].

Для того чтобы упростить расчет, ТКП EN 1993-2-2009 (п. 9.2.3) дает возможность использовать упрощенную модель усталостной нагрузки 71 для железнодорожных мостов по ТКП EN 1991-2-2009. За основу берется тот факт, что усталостные напряжения вызывает один поезд, описывающий статическое воздействие вертикальной нагрузки. Напряжение, возникающее в металлических элементах в ре-

зультате действия такой нагрузки, корректируется с помощью коэффициентов, чтобы получить единый диапазон напряжений, который за 2 млн циклов нанесет мосту столько же повреждений, сколько реальный поток транспорта за весь срок службы моста.

При расчете железнодорожных мостов по ТКП EN 1993-2-2009 (п. 9.4.1 (3)) применяется упрощенный метод эквивалентных напряжений для модели 71. Такой способ позволяет определить «контрольный диапазон усталостных напряжений»:

$$\Delta\sigma_p = \left| \Delta\sigma_{p,\max} - \Delta\sigma_{p,\min} \right|. \quad (2)$$

Это максимальное изменение напряжения в рассматриваемом элементе под действием усталостной нагрузки. После определения значения  $\Delta\sigma_p$  напряжение необходимо перевести в эквивалентный диапазон напряжений для 2 млн циклов ( $\Delta\sigma_{E2}$ ) таким образом, чтобы их можно было бы сравнивать с усталостными напряжениями, которые соответствуют 2 млн циклов напряжений одного диапазона. Для этого в ТКП EN 1993-2-2009 (п. 9.4.1 (4)) приводится следующая формула:

$$\Delta\sigma_{E2} = \lambda\varphi_2\Delta\sigma_p, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент эквивалентности негативного воздействия, который определяется по ТКП TN 1993-2-2009 (п. 9.5);  $\varphi_2$  – динамический коэффициент эквивалентного негативного воздействия. Для железнодорожных мостов значение этого коэффициента определяется по ТКП EN 1991-2-2009.

Аналогичным образом рассчитывается диапазон для напряжений сдвига:

$$\Delta\tau_p = \left| \Delta\tau_{p,\max} - \Delta\tau_{p,\min} \right|, \quad (4)$$

$$\Delta\tau_{E2} = \lambda\varphi_2\Delta\tau_p. \quad (5)$$

После определения эквивалентных напряжений проводится их подробный анализ и оценка по ТКП EN 1993-2-2009.

В данной статье не представляется возможным рассмотреть все тонкости расчета данного уровня. В связи с этим в качестве сравнительных данных приведем результаты М.М. Корнеева, представленные в его пособии по проектированию [8]. Сводная таблица представлена ниже.

Сравнение результатов определения выносливости  
по различным методикам

№ п/п	Особенности расчета выносливости	СНиП 2.05.03–84*	СНиП 11-23–81*	AASHTO LRFD	ENV 1993-2
1	Учитываются постоянные нагрузки	да	да	нет*	нет
2	Учитываются все временные нагрузки	да	да	нет	да
3	Учитываются только одиночные тяжелые нагрузки	нет	нет	да	нет
4	Нагрузка для расчетов близка к реальной, обращающейся по мосту	нет	да	да	нет
5	Учитывается влияние асимметрии цикла $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$	да	да	нет	нет
6	Учитывается реальное количество циклов нагружения	нет	да	да	нет
7	Учитываются прочностные характеристики стали	да	нет**	нет	нет
8	Методика позволяет учесть воздействия различной интенсивности	нет	нет	да	да
9	Расчет базируется на эффективных коэффициентах концентрации напряжений $\beta$	да	нет	нет	нет
10	Расчет базируется на табличных значениях пределов относительной выносливости, полученных при симметричных циклах	нет	да	да	да
11	Методика проста в использовании	нет	да	да	да

\*Если от постоянных нагрузок в рассчитываемом элементе возникает сжатие, то расчет не выполняется в том случае, если его величина больше удвоенного растяжения от временных воздействий. \*\*Прочностные характеристики стали учитываются только в случае отсутствия ошутимых концентраторов у исследуемой стали.

Актуальность данной темы не вызывает никаких сомнений, так как отечественные нормы не регламентировали расчеты железнодорожных мостов на усталость. Впервые такие требования были включены в СНиП 2.05.03–84\* «Мосты и трубы». Однако в дополнениях 1991 г. не учитывался ряд специфических особенностей работы металлических элементов на усталостные напряжения в железнодорожных мостах.



В заключение отметим, что назрела необходимость проводить полноценные расчеты по определению усталостной нагрузки и усталостной прочности для существующих железнодорожных мостов на основании методики, изложенной в европейских нормах. Основная цель данного расчета заключается в том, чтобы определять остаточный ресурс уже существующих и эксплуатируемых пролетных строений, выполненных из стальных ферм [14].

### Список литературы

1. Пастушков Г.П., Пастушков В.Г. О переходе на европейские нормы проектирования мостовых конструкций в Республике Беларусь // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 2. – С. 113–121.

2. Пастушков В.Г., Пастушков Г.П. Экспериментальные исследования пространственной работы железобетонных бездиафрагменных пролетных строений на крупномасштабных моделях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 2. – С. 141–151.

3. Пастушков В.Г. Особенности проектирования железобетонных сборно-монолитных балочных пролетных строений автодорожных мостов по новым нормативным требованиям Республики Беларусь // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – Т. 3. – С. 279–287.

4. Вайтович А.Н., Пастушков В.Г., Янковский Л.В. Исследование напряженно-деформированного состояния и усиление монолитных перекрытий транспортных сооружений с использованием стержневой системы преднапряжения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 1. – С. 26–34.

5. Дубинчик Е.В., Пастушков В.Г., Янковский Л.В. Особенности применения композитных материалов в строительстве // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – Т. 3. – С. 175–181.

6. Ходяков В.А., Пастушков В.Г. Высокие технологии в проектировании и строительстве мостов. Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – Т. 3. – С. 432–439.

7. Пастушков Г.П., Пастушков В.Г. Основные требования к проектированию мостовых конструкций в соответствии с европейскими нормами // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – Т. 3. – С. 368–375.

8. Мойсейчик Е.А., Мойсейчик Е.К., Пастушков В.Г. Приборы для неразрушающего контроля, диагностики и обследований мостовых сооружений // Депонированная рукопись № 858-В2007 от 31.08.2007.

9. Пастушков В.Г., Вайтович А.Н., Янковский Л.В. Сборно-монолитная плита проезжей части с контактным соединением специального профиля // Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – № 5(18). – С. 2.

10. Вайтович А.Н., Пастушков В.Г. Исследование технического состояния конструкций сталежелезобетонных большепролетных строений // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 372–374.

11. Пастушков В.Г., Пастушков Г.П. Некоторые особенности проектирования и строительства подземного общественно-торгового центра с паркингом в г. Минске // Наука та прогрес транспорту. – 2010. – № 32. – С. 91–95.

12. Пастушков В.Г., Янковский Л.В. Проектирование дорожной одежды над подземным сооружением торгового центра // Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – № 5(18).

13. Ходяков В.А., Пастушков В.Г. Применение теории эволюции дарвина в процессе оптимизации конструкций // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 534–538.

14. Испытание сталежелезобетонного пролетного строения длиной 55 метров с применением инновационного измерительного оборудования / Г.П. Пастушков, В.Г. Пастушков, В.А. Белый, А.А. Яковлев // Наука та прогрес транспорту. – 2010. – № 33. – С. 191–192.

## References

1. Pastushkov G.P., Pastushkov V.G., O perekhode na evropeiskie normy proektirovaniia mostovykh konstruksii v Respublike Belarus' [About transition to the European standards design of bridge structures in the Republic of Belarus]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhaiushchei sredy, transport, bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti*, 2011, no. 2, pp. 113-121.

2. Pastushkov V.G., Pastushkov G.P. Eksperimental'nye issledovaniia prostranstvennoi raboty zhelezobetonnykh bezdiafragmennyykh proletnykh stroenii na krupnomasshtabnykh modeliakh [Experimental study of spatial working non-diaphragm reinforced concrete span structures on large-scale models]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhaiushchei sredy, transport, bezopashost' zhiznedeiatel'nosti*, 2011, no. 2, pp. 141-151.

3. Pastushkov V.G. Osobennosti proektirovaniia zhelezobetonnykh sborno-monolitnykh balochnykh proletnykh stroenii avtodorozhnykh mostov po novym normativnym trebovaniiam Respubliki Belarus' [Features of design of reinforced concrete prefabricated monolithic beam superstructures of highway bridges under the new regulatory requirements of the Republic of Belarus]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse"*. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2012, vol. 3, pp. 279-287.

4. Vaitovich A.N., Pastushkov V.G., Iankovskii L.V. Issledovanie napriazhenno-deformirovannogo sostoiianiia i usilenie monolitnykh perekrytii transportnykh sooruzhenii s ispol'zovaniem sterzhnevoi sistemy prednapriazheniia [Study of stressed-strain state and the strengthening of monolithic slabs transport facilities using prestressing rod system]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhaiushchei sredy, transport, bezopashost' zhiznedeiatel'nosti*, 2013, no. 1, pp. 26-34.

5. Dubinchik E.V., Pastushkov V.G., Iankovskii L.V. Osobennosti primeneniia kompozitnykh materialov v stroitel'stve [Features of the application of composite materials in the construction]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse"*. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013, vol. 3, pp. 175-181.

6. Khodiakov V.A., Pastushkov V.G. Vysokie tekhnologii v proektirovanii i stroitel'stve mostov [High technology in the design and construction of bridges.]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse"*. Perm: Permskii natsionalnyi issledovatel'skii politechnicheskii universitet, 2013, vol. 3, pp. 432-439.

7. Pastushkov G.P., Pastushkov V.G. Osnovnye trebovaniia k proektirovaniu mostovykh konstruksii v sootvetstvii s evropeiskimi normami [Basic requirements for the design of bridge structures in accordance with European standards]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse"*. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politechnicheskii universitet, 2013, vol. 3, pp. 368-375.

8. Moiseichik E.A., Moiseichik E.K., Pastushkov V.G. Pribory dlia nerazrushaiushchego kontrolya, diagnostiki i obsledovaniia mostovykh sooruzhenii [Devices for non-destructive testing, diagnosis and surveys of bridges]. *Deponirovannaia rukopis', no. 858-V2007, 31.08.2007*.

9. Pastushkov V.G., Vaitovich A.N., Iankovskii L.V. Sbornomonolitnaia plita proezzhei chasti s kontaktnym soedineniem spetsial'nogo profil'ia [Pre-cast slab of the carriageway contact connections special profile]. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"*, 2013, no. 5(18), p. 2.

10. Vaitovich A.N., Pastushkov V.G. Issledovanie tekhnicheskogo sostoianiia konstruksii stalezhelezobetonnykh bol'sheproletnykh stroenii [Examination of technical state of constructions span composite structures]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse"*. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politechnicheskii universitet, 2014, vol. 1, pp. 372-374.

11. Pastushkov V.G., Pastushkov G.P. Nekotorye osobennosti proektirovaniia i stroitel'stva podzemnogo obshchestvenno-torgovogo tsentra s parkingom v g. Minske [Some features of the design and construction of the underground social-shopping center with parking in Minsk]. *Nauka ta progress transport*, 2010, no. 32, pp. 91-95.

12. Pastushkov V.G., Iankovskii L.V. Proektirovanie dorozhnoi odezhdy nad podzemnym sooruzheniem torgovogo tsentra [Design of pavement over the underground shopping center construction]. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"*, 2013, no. 5(18).

13. Khodiakov V.A., Pastushkov V.G. Primenenie teorii evoliutsii darvina v protsesse optimizatsii konstruktсии [Application of the theory of Darwinian evolution in the process of structural optimization]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse"*. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politechnicheskii universitet, 2014, vol. 1, pp. 534-538.

14. Pastushkov G.P., Pastushkov V.G., Belyi V.A., Iakovlev A.A. Ispytanie stalezhelezobetonnoho proletnogo stroeniia dlinoi 55 metrov s primeneniem innovatsionnogo izmeritel'nogo oborudovaniia [Test the composite superstructure length of 55 meters with the use of innovative instrumentation]. *Nauka ta progres transport*, 2010, no. 33, pp. 191-192.

Получено 10.03.2015

#### **Об авторе**

**Кисель Максим Александрович** (Минск, Республика Беларусь) – ассистент кафедры «Мосты и тоннели» Белорусского национального технического университета (220014, г. Минск, пр. Независимости, 150, e-mail: chief.kisel2012@yandex.ru).

#### **About the author**

**Maksim A. Kisel** (Minsk, Belarus) – Assistant, Department of Bridges and Tunnels, Belarusian National Technical University (150, Independence av., Minsk, 220014, Belarus, e-mail: chief.kisel2012@ yandex.ru).