

С.Б. Шаяхметов¹, О.Д. Сейтказинов², К.Т. Сиикмбекова³

¹д.т.н., профессор, ²к.т.н., доцент, ³преподаватель специальных дисциплин,
¹КазАТК им. М. Тынышпаева, ²КазГАСА, ³Алматинский государственный
колледж транспорта и коммуникаций, г. Алматы, Республика Казахстан

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО МОСТА

Аннотация. В данной работе приведены проектирование и расчеты мостовых конструкций с применением современных компьютерных технологий. В них предусмотрены необходимые для расчета мостов специальные возможности, например, построение линий влияния для расчета на подвижные нагрузки, для расчета узловых сопряжений, для проверки местной устойчивости, для расчета термонапряженного состояния опор и т.д.

Основной целью проведенного обследования конструкций моста являлось получение исходных данных согласно ГОСТ-в и СНиП-в для выполнения расчета грузоподъемности пролетного строения моста, оценки технического состояния и разработки рекомендаций по его дальнейшей эксплуатации.

Ключевые слова: проектирование, конструкция, компьютерная программа, прочность, несущая способность, стабильность, долговечность, железнодорожный путь, железнодорожный мост.

Модернизация железнодорожного моста направлена на повышение прочности, несущей способности, стабильности, долговечности и других показателей надежности как железнодорожного пути в целом, так и его составных частей, и элементов, обеспечивающих увеличение продолжительности жизненного цикла, сокращение трудоемкости и стоимости технического обслуживания пути и получение экономического эффекта при его эксплуатации.

К модернизации железнодорожного моста относятся работы, приводящие к изменению категории пути, а также к повышению грузоподъемности искусственных сооружений, способности пути и искусственных сооружений нести повышенные осевые и погонные нагрузки, изменению пространственных характеристик (плана и профиля пути, геометрии балластной призмы, земляного полотна, негабаритных мест), изменению конструкции пути с устройством новых водоотводных, защитных и укрепительных сооружений [1-4].

Металлические мосты сооружают на различных дорогах, в любых климатических условиях. На железных дорогах нашей страны они составляют более 50% от общей протяженности мостов. При строительстве мостов через широкие глубоководные реки стальные конструкции экономически целесообразны при больших пролетах (свыше 100м). Это сокращает число опор, что с учетом их высоты и материалоемких фундаментов существенно снижает объемы и трудоемкость работ, уменьшает продолжительность и стоимость строительства. Но в некоторых случаях применение стальных пролетных строений целесообразно даже в средних пролетах (длиной 20...40м). Стальные

пролетные строения имеют различные статические системы и разнообразные конструктивные формы. Они легко расчленяются на блоки и элементы любых размеров, удобные для производства, перевозки и монтажа. Поэтому большим преимуществом стальных мостов является возможность максимальной индустриализации их изготовления, применение высокопроизводительной автоматической электросварки, высокое качество и степень заводской готовности конструкций, а также возможность комплексной механизации, круглогодичность исполнения и монтаж в сокращенные сроки.

В процессе разработки любой конструкции проектировщик решает задачу оценки ее напряженно-деформированного состояния. Для этого нужно знать картину распределения напряжений во всех элементах проектируемой конструкции и величины перемещений характерных точек как при статическом характере внешнего нагружения, так и в условиях действия изменяющихся во времени нагрузок.

На сегодняшний день проектирование и расчеты мостовых конструкций невозможны без применения современных компьютерных технологий. Это программные комплексы МКЭ, ориентированные на расчет мостовых конструкций, которые позволяют строить расчетные конечно-элементные модели сооружений с минимальными затратами труда. В них предусмотрены необходимые для расчета мостов специальные возможности (например, построение линий влияния для расчета на подвижные нагрузки, для расчета узловых сопряжений, для проверки местной устойчивости, для расчета термонапряженного состояния опор и т.д. [5]).

При традиционном подходе для решения такой задачи в общем случае необходимо решить систему уравнений, обеспечивающих выполнение условий равновесия и совместности деформаций. Возникающая в связи с этим проблема заключается в том, что в случае сложной двумерной или трехмерной конструкции поведение системы описывается уравнениями высоких порядков с большим количеством неизвестных. Одним из способов устранения этой трудности является использование приближенных методов решения.

В настоящее время наиболее эффективным приближенным методом решения прикладных задач механики является метод конечных элементов (МКЭ) [6-7]. Этот метод по существу сводится к аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы совокупностью подобластей (или элементов), имеющих конечное число степеней свободы. Для каждого элемента задаются некоторые функции формы, позволяющие определить поле перемещений внутри элемента по перемещениям в узлах, т.е. в местах стыков конечных элементов (КЭ). Взаимодействие КЭ друг с другом осуществляется только через узлы. Действующие на КЭ внешние нагрузки, такие как сосредоточенные и распределенные силы и моменты, приводятся к его узлам и носят название узловых нагрузок.

При расчетах методом КЭ вначале определяются перемещения узлов модели. Величины внутренних усилий в элементе пропорциональны перемещениям в его узлах. Коэффициентом пропорциональности выступает квадратная матрица жесткости, количество строк которой равно числу степеней

свободы элемента. Все остальные параметры КЭ такие, как напряжения, поле перемещений и т.п., вычисляются на основе его узловых перемещений.

Основными типами применяемых на практике конечных элементов являются:

- стержневые;
- оболочечные/пластинчатые;
- объемные.

Все многообразие моделей конструкций и деталей может быть описано с помощью КЭ разных типов или их комбинаций. В то же время такой подход неприменим при расчетах геометрически изменяемых конструкций, которые превращаются в механизмы.

Анализ существующих САПР, используемых при проектировании металлоконструкций

На сегодняшний день проектирование и расчеты мостовых конструкций невозможны без применения современных компьютерных технологий. Это программные комплексы МКЭ, ориентированные на расчет мостовых конструкций, такие, как: LUSAS (Великобритания), GTSTRUDL (США), MIDAS/CIVIL (Корея) и RM BRIDGE (Австрия), SOFISTIK, MICROFE (Германия), SCAD Soft (Россия), LIRA (Украина), ANSYS, NASTRAN, Cosmos-M, SolidWorks, (США) и другие, которые позволяют строить расчетные конечно-элементные модели сооружений с минимальными затратами труда. В них предусмотрены необходимые для расчета мостов специальные возможности (например, построение линий влияния для расчета на подвижные нагрузки, для расчета узловых сопряжений, для проверки местной устойчивости, для расчета термонапряженного состояния опор и т.д. [7].

Таким образом, программы-конверторы являются необходимым звеном в арсенале программных средств на рабочем месте современного инженера-расчетчика. Для выполнения расчетов мостовых конструкций на современном научно-техническом уровне инженер-расчетчик должен располагать набором различных программных комплексов, объединенных в единую систему с помощью специальных программ, предназначенных для конвертирования расчетных задач из одной программы в другую [8].

Методика автоматизированного проектирования ж/д моста

Статический расчет конструкции пролета железнодорожного металлического моста производится в программном комплексе АРМ WinMachine.

Комплекс АРМ Win Machine относится к классу САД/САЕ-систем, а его разработчик – известная российская компания НТЦ АПМ. Важным моментом при выборе данного программного комплекса является наличие русскоязычного интерфейса и документации. Модуль АРМ Structure3D предназначен выполнять расчеты: величин напряжений и деформаций в любой точке конструкции; устойчивости как системы в целом, так и отдельных ее элементов; динамических характеристик собственных и вынужденных механических колебаний системы.

Кроме того, использование модуля APM Structure3D системы APM WinMachine позволяет значительно сократить сроки исполнения проектно-конструкторских работ [9].

Требуется создать расчетную модель и выполнить статический расчет пролета металлического железнодорожного моста.

Общий порядок расчета:

1. Создание плоской стержневой модели рамы моста.
2. Умножение плоской рамы с целью создания трехмерной модели стержневой конструкции.
3. Присвоение поперечного сечения стержневым элементам модели конструкции и задание параметров материала.
4. Закрепление модели конструкции с помощью опор.
5. Задание силовых факторов, действующих на элементы модели.
6. Выполнение расчета.
7. Просмотр результатов расчета.

Моделирование напряженно-деформируемого состояния железнодорожного металлического моста начинается с создания стержневой геометрии конструкции рисунок 1. Перед процессом создания модели лучше всего планировать таким образом, чтобы большую ее часть можно было получить «выталкиванием» плоской конструкции в определенном направлении.

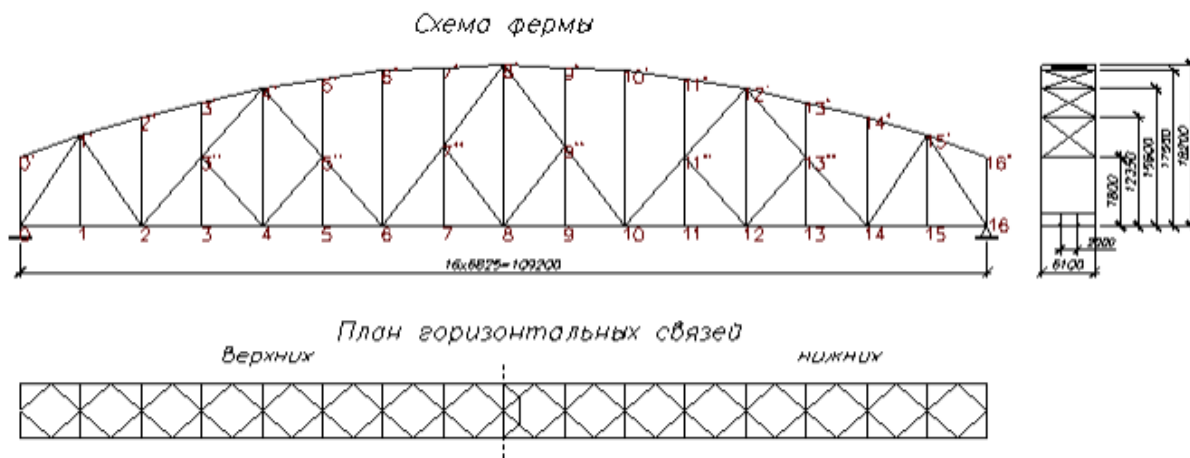


Рис. 1 – Схема расчетной фермы

Далее нужно каждому стержневому элементу модели присвоить определенное сечение. Поперечное сечение в APM Structure3D может быть выбрано из двух источников: библиотеки сечений и параметрической базы данных. В данной программе имеется также редактор поперечных сечений. Это встроенный чертежно-графический редактор, созданный на основе APM Graf, в котором по сравнению с базовым вариантом добавлена специальная функция создания поперечных сечений. Так как в библиотеке нет необходимых для нас сечений мы создаем нужное для нас и задаем ее стержням моста на рисунке 2. Созданное коробчатое сечение показано на рисунке 3. Для удобства работы

разделяем стержни на слои. После того как задали сечение стержням необходимо задать параметры материала (марка стали ст3). В нашем случае на одно пролетное строение 114 узлов, 271 стержня и 5 поперечных сечений. По чертежам моста была создана стержневая модель. Модель моста показана на рисунке 2.

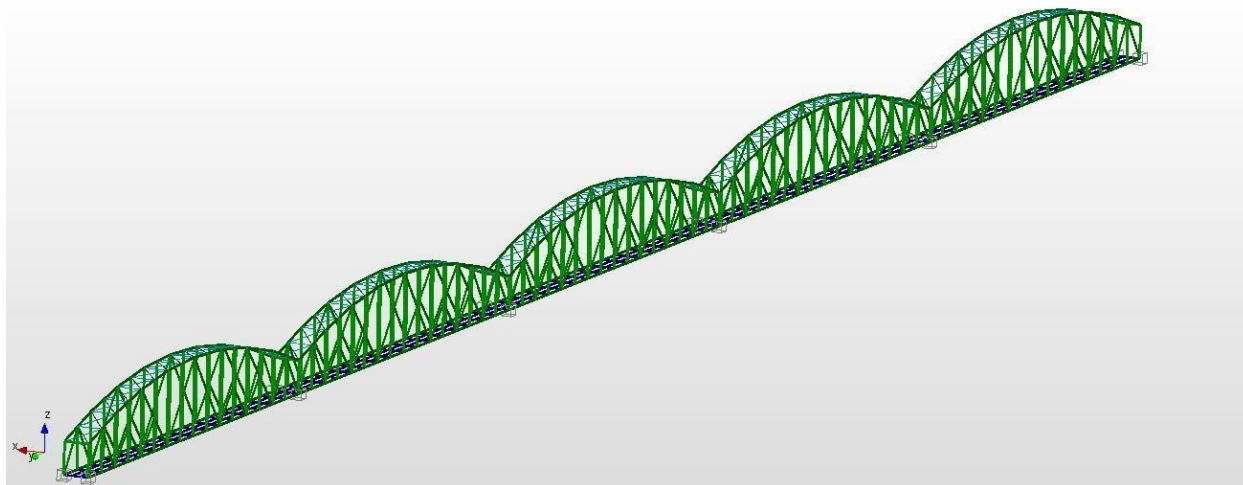


Рис. 2 – Стержневая модель моста

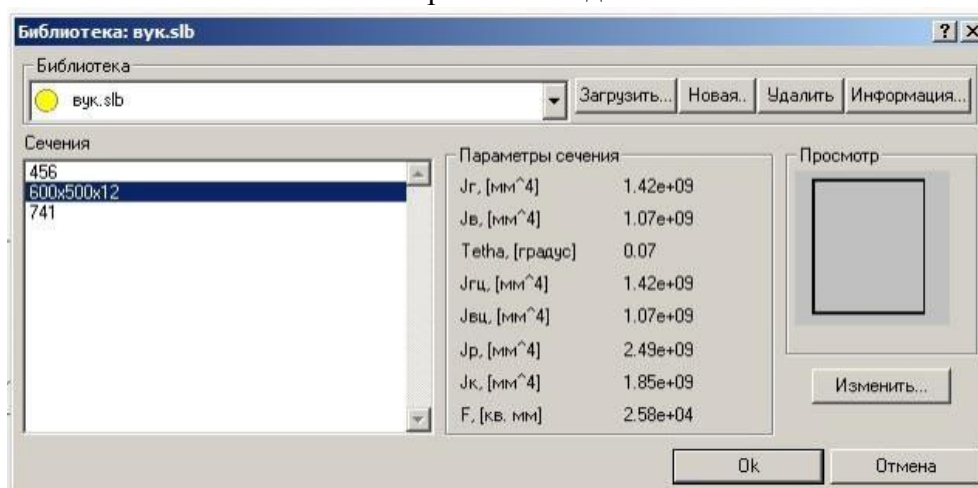


Рис. 3 – Созданное коробчатое сечение

Следующим шагом методики проектирования металлических мостов является создание и закрепление опорных частей. Подвижные опорные части русловых пролетных строений – катковые. Все подвижные опорные части расположены на концах пролетных строений со стороны левого берега. Неподвижные опорные части русловых пролетных строений расположены со стороны правого берега. Климатический район – IIIА, средняя годовая температура воздуха в городе где расположен исследуемый мост +3,2°С, температурные отклонения составляет от +49°С до -52°С.

Нормативная нагрузка от собственного веса конструкций включает, помимо веса конструкций, вес постоянных смотровых приспособлений, опор и

проводов линий электрификации и связи, и т.д. Разнесение нагрузок – нормативной от собственного веса конструкций и нормативной от собственного веса одежды ездового полотна – связано с тем, что для них различаются коэффициенты надежности по нагрузке γ_f . Это необходимо выполнять для всех постоянных нагрузок с различными коэффициентами надежности по нагрузке. Задание постоянной нагрузки не представляет особой сложности, поэтому более подробно остановимся на задании подвижных нагрузок.

Нормативная временная нагрузка от собственного веса продольных балок проезжей части моста представляет равномерно распределенная нагрузка, интенсивность которой составляет $q = 16,65$ кН/м. Заполнение параметров нормативной временной нагрузки представлено на рисунке 4.

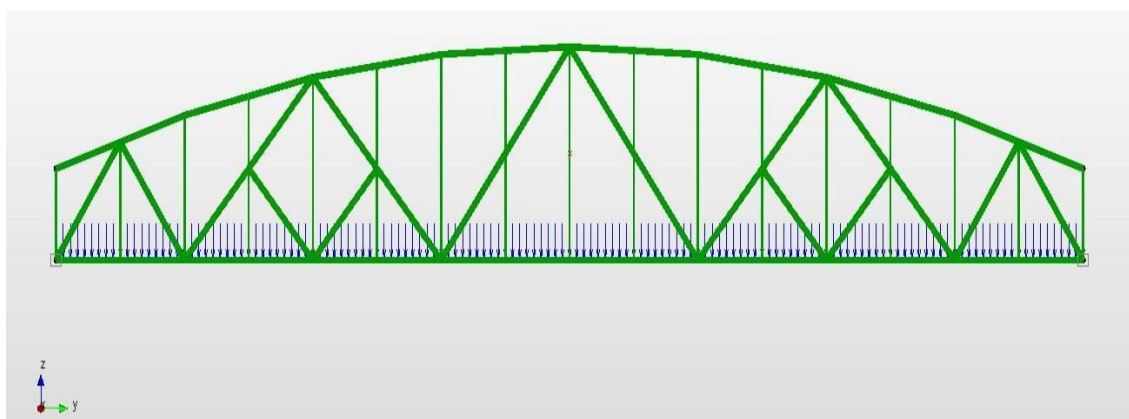


Рис. 4 – Равномерно распределенная нагрузка

Далее две параллельные продольные балки загружаем сосредоточенной нагрузкой от воздействия колесной пары подвижного состава 12 тонн на ось.

Расчет напряженно-деформированного состояния стержневой модели железнодорожного металлического моста необходимо выполнить на следующие виды нагрузки:

- постоянная (нормативная нагрузка от собственного веса конструкций – загрузка 1, нормативная нагрузка от собственного веса одежды ездового полотна – загрузка 2);
- временные (вертикальные нагрузки от подвижного состава);
- прочие (ветровая нагрузка, температурные климатические воздействия – эти нагрузки из-за ограниченности места рассматриваться не будут).

Мост будет находиться под действием трех силовых факторов: собственного веса, равномерно-распределенной нагрузки и сосредоточенной нагрузки. Учет собственного веса в программе реализуется через опцию «загружения», «множитель собственного веса». По умолчанию множитель собственного веса равен нулю, а для того чтобы учесть следует его изменить на 1.

Выполняем статический расчет и анализируем полученные данные. Программа генерирует диаграммы эквивалентных напряжений и перемещений на рисунке представлены результаты напряжений.

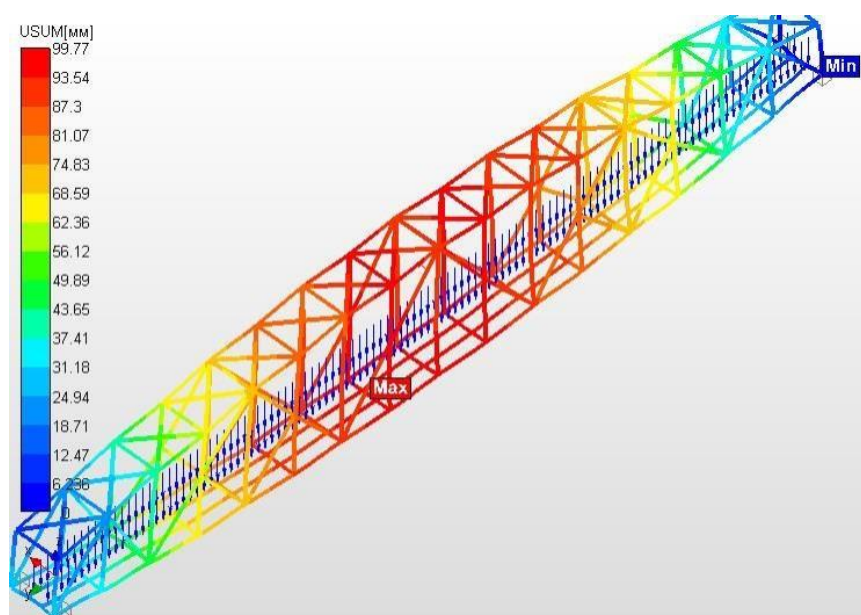


Рис. 5 – Диаграмма напряжений

По результатам значений максимальных напряжений достигает уровня $\sigma_{max} = 99,77$ МПа.

В комбинациях нагружения были созданы 3 случая, из них следующей была просчитана комбинация от действия колесной пары. Она моделировалась в виде сосредоточенной нагрузки по длине моста в разных положениях согласно линиям влияния. Результаты представлены на рисунке 38. По результатам значений максимальных напряжений достигает уровня $\sigma_{max} = 143,9$ МПа.

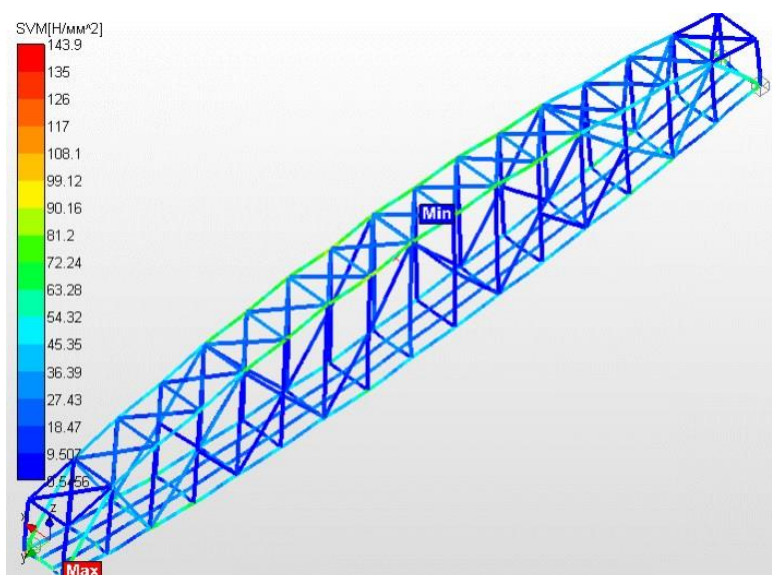


Рис. 6 – Диаграмма напряжений от временной нагрузки

По результатам проведенных расчетов делаем вывод, что конструкция моста обладает достаточным коэффициентом прочности, то же можно сказать и

по критериям жесткости максимальное перемещение продольной балки проезжей части у тах достигает величины 5.42.

В ходе проведения испытаний были выполнены следующие работы:

1. Произведены измерения фактических значений изгибных деформаций и получены напряжения, возникающих в конструкциях пролетного строения моста (фермы №1 и №5) под действием обращаемого подвижного состава.

2. Выполнены динамические испытания и получены собственные частоты и периоды пролетного строения моста (фермы №1 и №5).

Основной целью проведенного обследования конструкций моста являлось получение исходных данных согласно ГОСТ Р 54257-2010, СП 46.13330.2012 (СНиП 3.06.04-91) и СП 79.13330.2012 (СНиП 3.06.07-86) для выполнения расчета грузоподъемности пролетного строения моста, оценки технического состояния и разработки рекомендаций по его дальнейшей эксплуатации.

Выводы

В процессе выполнения данной работы по проектированию металлических конструкций с применением современных САПР технологий нами было использована методика проектирования металлического железнодорожного моста.

По результатам проведенных расчетов делаем вывод, что конструкция моста обладает достаточным коэффициентом прочности, то же можно сказать и по критериям жесткости максимальное перемещение продольной балки проезжей части утах достигает величины 5.42.

В заключении можно сделать вывод об эффективности применения современных систем автоматизированного проектирования при определении коэффициента запаса прочности основных элементов железнодорожного металлического моста. Кроме того, использование САПР позволяет значительно сократить сроки исполнения проектно-конструкторских работ.

Литература:

1. СП РК 3.03-113-2014. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний. – Алматы, Комитет по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики РК, 2015.
2. Правила по устройству и содержанию искусственных сооружений на железнодорожном транспорте. – Астана: АО «НК«Қазақстан темір жолы», 2015. – 677 с.
3. Приказ Министра транспорта и коммуникаций Республики Казахстан от 26 ноября 2013 года № 944 «Об утверждении профессионального стандарта «Текущий ремонт и содержание искусственных сооружений на железнодорожной магистральной сети».
4. Инструкция по содержанию искусственных сооружений ЦП-628-78-03 – Астана: МТiК РК, 2013.
5. СНиП 3.03-113-2014. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний. – Алматы, Комитет по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики РК, 2015.
6. НТП РК 03-02.1-2012 Проектирование стальных конструкций. Часть. Стальные мосты.
7. Инструкция по применению высокопрочных болтов в эксплуатируемых мостах, утвержденная приказом Министра транспорта и коммуникаций 18 июня 1997 года №491.

8. Донец А.Н., Соловьев Л.Ю., Тихомиров С.А. Проектирование металлических мостов. Расчет проезжей части. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2010. – 48 с.

Бұл мақалада заманауи компьютерлік технологияларды қолдану арқылы көпірлік құрылымдарды есептеу және жобалау жолдары келтірілген.

Олардың ішінде көпірлерді есептеуге арналған арнайы мүмкүндіктер қамтыла қарастырылған мысалы, жылжымалы жүктемелерге әсер етуші желістерді тұрғызудағы есептеуге арналған мүмкүндік, түйіндік қатынастарды есептеу мүмкүндігі, жергілікті тұрақтылықты тексеру мүмкүндігі, тіреулердің термокернеулік жағдайын есептеу мүмкүндігі және т.б.

Көпірдің аралық құрылымының жүккөтергіштігін есептеуін орындауға, техникалық жағдайын бағалауға және оның кейінгі пайдаланылуы бойынша ұсыныстарды өңдеуге арналған МЕМСТ-ң және ҚНжәнеҚ-а сәйкес келетін бастапқы мәліметтерді алу көпір құрылымына тексеру жүргізудегі ең негізгі мақсат болып табылады.

Түйін сөздер: жобалау, құрылым, компьютерлік бағдарлама, беріктік, көтергіш қаблет, тұрақтылық, ұзақмәнділік, теміржол, теміржол көпірі.

This paper presents the design and calculations of bridge structures using modern computer technology. They provide the special capabilities necessary for the design of bridges, for example, the construction of influence lines for calculating moving loads, for calculating nodal interfaces, for checking local stability, for calculating the thermal stress state of supports, etc.

The main purpose of the survey of the bridge structures was to obtain the initial data in accordance with GOST-v and SNIП-v for calculating the carrying capacity of the bridge superstructure, assessing the technical condition and developing recommendations for its further operation.

Key words: design, construction, computer program, strength, bearing capacity, stability, durability, railway track, Railway Bridge.