

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian journal of transport engineering <http://t-s.today/>

2016, Том 3, №2 / 2016, Vol 3, No 2 <http://t-s.today/issues/vol3-no2.html>

URL статьи: <http://t-s.today/PDF/05TS216.pdf>

DOI: 10.15862/05TS216 (<http://dx.doi.org/10.15862/05TS216>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Семенов А.А., Порываев И.А., Ахметдинова Г.Р. Анализ напряженно-деформированного состояния конструкций моста Forth Rail Bridge // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 3, №2 (2016) <http://t-s.today/PDF/05TS216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Semenov A.A., Poryvaev I.A., Akhmetdinova G.R. [Analysis of the stress-strain state of the Forth Rail Bridge structures] Russian journal of transport engineering, 2016, Vol. 3, no. 2. Available at: <http://t-s.today/PDF/05TS216.pdf> (In Russ.)

УДК 624.35

Семенов Александр Александрович

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Россия, Уфа¹
Профессор кафедры «Строительные конструкции»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: asfugntu@yandex.ru

Порываев Илья Аркадьевич

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Россия, Уфа
Старший преподаватель кафедры «Строительные конструкции»
E-mail: iporivaev@gmail.com

Ахметдинова Гульнара Ришатовна

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Россия, Уфа
Магистр по профилю «Теория и проектирование зданий и сооружений»
E-mail: g.ahmetdinova@mail.ru

Анализ напряженно-деформированного состояния конструкций моста Forth Rail Bridge

Аннотация. В российской и зарубежной практиках строительного проектирования метод конечных элементов находит широкое применение при анализе напряженно-деформированного состояния как объектов нового строительства, так и уже существующих конструкций. Особый интерес представляет моделирование и анализ конструкций, спроектированных по объективным причинам без использования программных комплексов, но между тем, представляющих историческую и культурную ценность. Именно таким объектом и является консольный мост Форт Рэйл Бридж, возведенный с 1882 по 1890 годы через залив Ферт-оф-Форт.

Целью данной работы является анализ напряженно-деформированное состояние моста Форт Рэйл Бридж на конечно-элементной модели, созданной с использованием программного комплекса Scad Office.

Для достижения желаемых результатов были поставлены и выполнены следующие задачи:

¹ 450022, г. Уфа, ул. Менделеева 195, ауд. 6-313

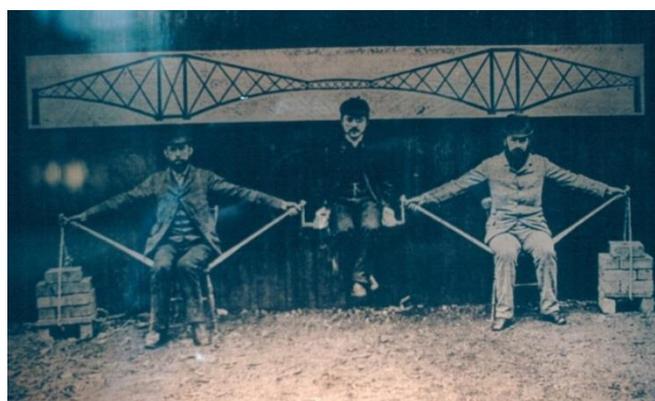
1. создать расчетную конечно-элементную модель с соответствующими жесткостными характеристиками, связями и нагрузениями;
2. произвести расчет и получить напряженно-деформированное состояние расчетной модели;
3. сопоставить полученные результаты с действующими нормами и оценить соответствие исследуемых конструкций современным стандартам.

Рассмотренный пример расчета сооружения моста Форт Рэйл Бридж в программном комплексе Scad Office подтверждает факт, что использование программных продуктов является незаменимым при анализе существующих конструкций зданий и сооружений при их дальнейшей реконструкции. Полученные результаты наглядно иллюстрируют «слабые места» или, наоборот, выявляют запас прочности в элементах, которые позволяют минимизировать экономические затраты при реконструкции исторических объектов.

Ключевые слова: железнодорожный мост; консоль; метод конечный элементов; программный комплекс Scad Office; напряженно-деформированное состояние; жесткость; пространственная модель; нагрузка; ветровое воздействие; опоры

Вторую половину XIX века можно ознаменовать как эпоху железнодорожного бума в Европе. В истории был замечен максимальный уровень прироста мировой железнодорожной сети. За десять лет, с 1880 по 1890 г., сеть дорог выросла на 245 тыс. км, достигнув 617,3 тыс. км [1]. Данный скачок вызвал необходимость в создании мостовых сооружений, отвечавших заданным требованиям надежности и долговечности, для преодоления различного рода препятствий. Одним из примеров является конструкция консольного моста Форт Рэйл Бридж через залив Ферт-оф-Форт в Шотландии, построенный в конце XIX в.

Форт Рэйл Бридж был спроектирован и построен инженерами Джоном Фаулером (1817—1898 гг.) и Бенджамином Бейкером (1840—1907 гг.) в период с 1882 по 1890 года. Данный мост возводился после обрушения его предшественника через соседний залив Ферт-оф-Тей, который не выдержал сильной ветровой нагрузки во время шторма [2]. В качестве расчетной схемы моста авторами была выбрана консольная система, которая являлась принципиально новым решением в конце XIX века. Данная конструктивная схема показала свою эффективность на наглядном примере, приведенном инженерами (рис. 1). Мост представляет собой сквозную решетчатую конструкцию.



*Рисунок 1. Схема работы консольной системы [4]
Figure 1. Workflow of the console system [4]*

В месте проектируемого мостового перехода максимальная глубина воды в заливе составляет 65 метров. Данное обстоятельство не позволяло в те времена соорудить

многочисленные и дорогостоящие промежуточные опоры. Поэтому на размещение фундаментов и конструктивную схему Форт Рэйл Бридж повлияло размещение островов в створе мостового перехода. Четыре столба каждой промежуточной опоры установлены на цилиндрические кессоны (рис. 2), погруженные на 21,3 м в скальное основание.

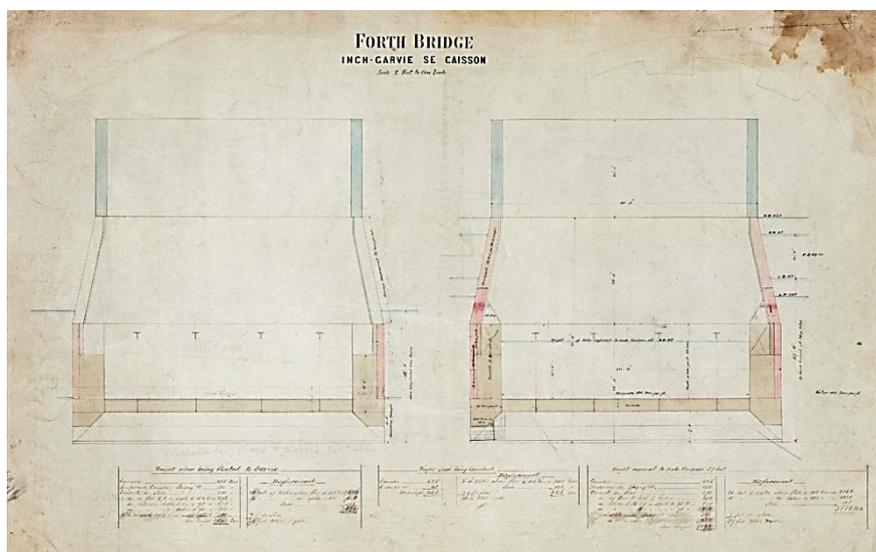


Рисунок 2. Чертеж кессона моста [4]
Figure 2. Drawing of bridge caisson [4]

Для обеспечения устойчивости конструкции при монтаже, строительство шести консолей моста велось одновременно методом навесного монтажа без использования промежуточных опор. Сжатые распорки консолей длиной 207,3 м представляют собой трубчатое сечение диаметром от 1,2 до 2,4 м. Сжатые пояса консолей (рис. 3) пролетного строения имеют трубчатое переменное сечение, верхние растянутые пояса консолей (рис. 4) – пространственные четырехгранные фермы. Высота строения в трех промежуточных опорах составляет 100,6 м. Полная длина моста составляет 2460 м, включая два пролета по 521 м. Данный пролет являлся максимальным до строительства Квебекского моста через реку Святого Лаврентия в 1917 году. [3, 4].

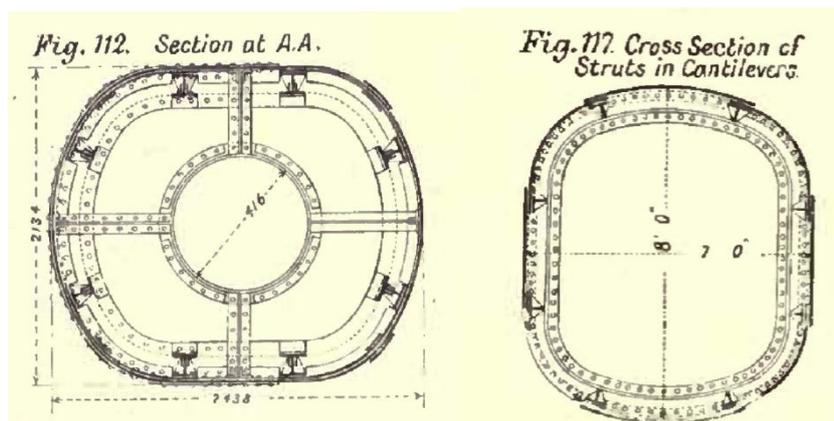


Рисунок 3. Сечения сжатых элементов консолей [4]
Figure 3. Cross sections of the console compressed elements [4]

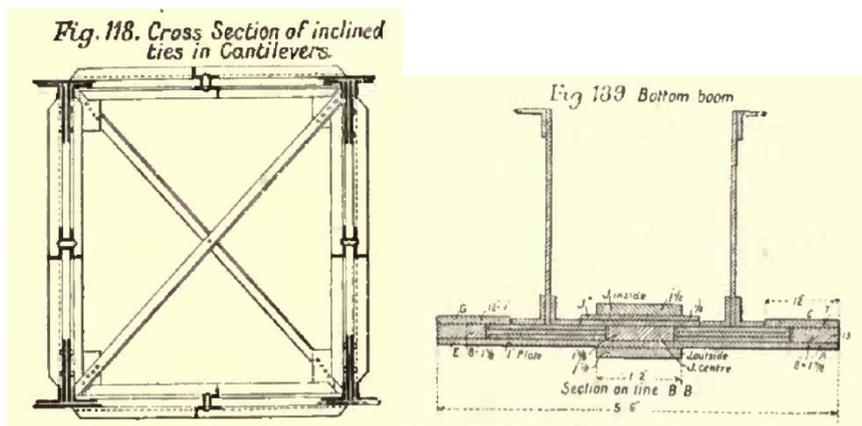


Рисунок 4. Сечения растянутых элементов консолей [4]
Figure 4. Cross sections of the stretched console elements [4]

Основой несущих конструкций является сталь, которая была впервые использована для железнодорожных мостов. Для сооружения потребовалось 58000 т металлических конструкций. Общая площадь металлических поверхностей моста составляет 18000 кв. м [3, 4]. На сегодняшний день мост является действующим, на рис. 5 представлен его современный вид.



Рисунок 5. Мост Forth Rail Bridge
Figure 5. Forth Rail Bridge

Мосты - уникальные сооружения, и их проектирование является важным и ответственным этапом строительства, в котором необходимо учитывать совокупность архитектурных и конструктивных решений. На сегодняшний день использование возможностей современных программных продуктов позволяет получать приближенную к реальности оценку напряженно-деформированного состояния как проектируемых, так и исторически важных объектов строительства. Одним из основных численных методов для анализа напряженно-деформированного состояния строительных конструкций различного класса и назначения является метод конечных элементов.

В российской и зарубежной практиках строительного проектирования метод конечных элементов находит широчайшее применение при анализе напряженно-деформированного состояния, как объектов нового строительства, так и уже существующих конструкций [5-13]. Например, в работе [11] была произведена оценка несущей способности опор моста в программном комплексе Scad Office (далее ПК Scad) до и после ремонта основных конструкций пролетного строения, что еще раз подчеркивает актуальность выбранной темы.

Особый интерес представляет моделирование и анализ конструкций, спроектированных без использования программных комплексов, но между тем,

представляющих историческую и культурную ценность. Именно таким объектом и является мост через залив Ферг-оф-Форт.

Задачи такого рода представляют собой и методическую ценность для студентов высших учебных заведений, которые приобретают практические навыки работы с графическими редакторами и программными комплексами, и закрепляют полученные теоретические знания [16, 17].

Целью данной работы являлось проанализировать напряженно–деформированное состояние моста Форт Рэйл Бридж с использованием ПК Scad.

Для достижения желаемых результатов были поставлены следующие задачи:

- создать расчетную конечно-элементную модель с соответствующими жесткостными характеристиками, связями и нагрузениями;
- произвести расчет и выполнить анализ напряженно-деформированного состояния основных несущих элементов на расчетное сочетание усилий (PCY);
- сопоставить полученные результаты с действующими нормами и оценить соответствие исследуемых конструкций современным стандартам.

Алгоритм создания расчетной модели приведен на рисунке 6.

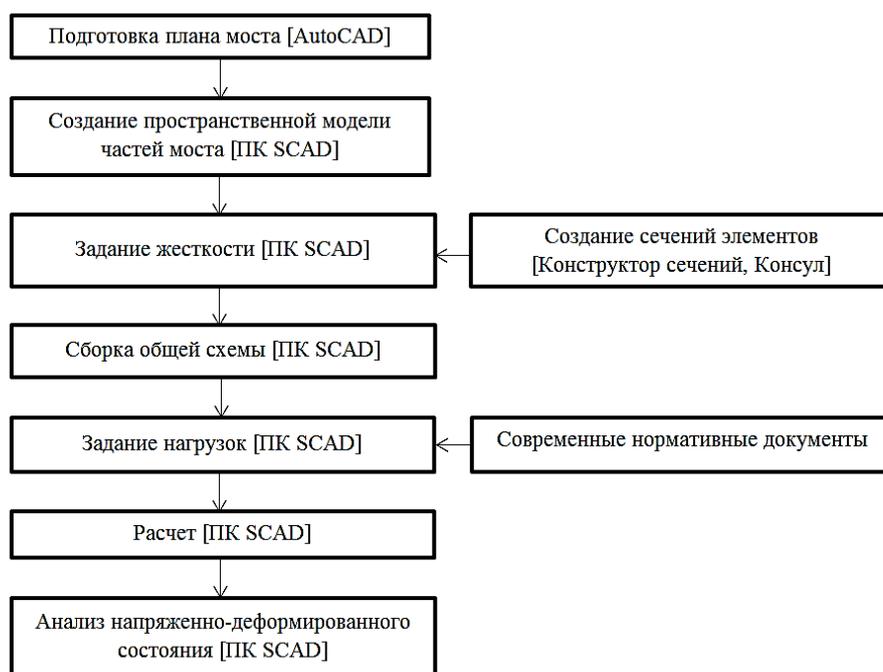


Рисунок 6. Алгоритм создания расчетной модели
Figure 6. Algorithm of creating computational model

Первым этапом моделирования была подготовка расчётной модели в графическом редакторе AutoCAD, с последующим импортом его в ПК Scad. За основу были взяты чертежи металлических конструкций моста (рис. 7) [4]. Для удобства мост был разбит на три части.

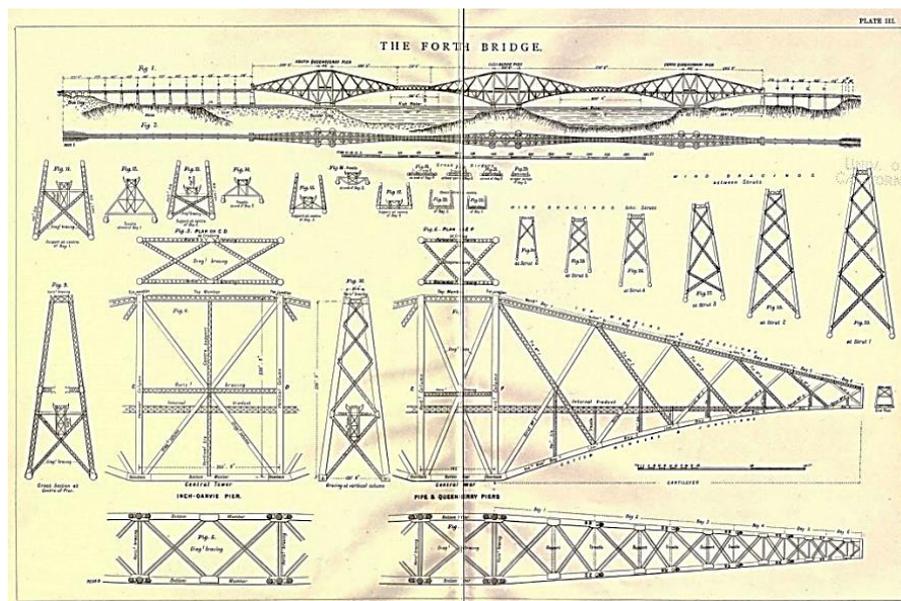


Рисунок 7. Чертеж металлоконструкций моста [4]
Figure 7. Drawing of the metal bridge structures [4]

После импорта в ПК Scad была получена пространственная модель каждой части сооружения из конечных элементов - стержней. Сечения конструкций моста состоят из труб диаметром 0,5-3,6 м и решетчатых профилей с острыми кромками в виде пространственных четырехгранных ферм коробчатого сечения. Сечения металлоконструкций создавались в сателлитах ПК Scad Конструктор сечений и Консул.

Окончательным этапом моделирования было соединение всех частей в одну единую конструкцию. Данный вид работы выполнялся в режиме сборки в ПК Scad.



Рисунок 8. Конечно-элементная модель моста в ПК Scad
Figure 8. The finite-element model of bridge in the PC Scad

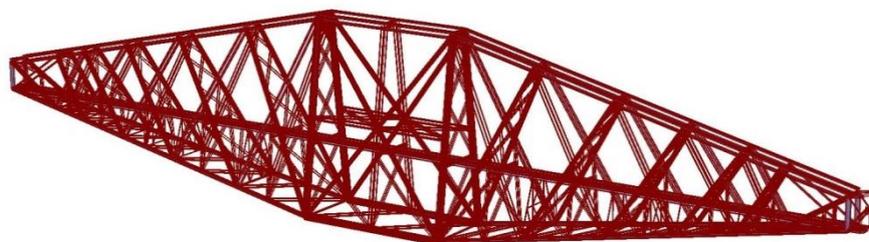


Рисунок 9. Конечно-элементная модель центральной части моста в ПК Scad
Figure 9. The finite-element model of the central part of bridge in the PC Scad

На полученную модель задавались следующие виды загружений:

1. собственный вес

Приложенная нагрузка от собственного веса, вычисленная программой исходя из объемного веса стали, составила 48,5 тыс. т. Полученное значение отличается от существующего, т.к. из-за недостатка информации по строению нами не учитывался вес соединительных деталей (стальные заклепки, сварные швы), вес мелких элементов конструкций. Кроме того, в стержневой модели невозможно задать поперечные ребра жесткости. Для этого необходимо рассматривать создание оболочечной модели сооружения. Данное обстоятельство было учтено введением поправочного коэффициента 1,2.

2. ветровое воздействие

Ветровое воздействие было рассчитано согласно алгоритму, приведенному в табл. 5.1 EN 1991-1-4 с учетом пульсаций, вызываемых порывами ветра.

Согласно формуле NA.1 EN 1991-1-4 основное значение базовой скорости ветра:

$$v_{b,0} = v_{b,map} \cdot c_{alt} = 25 \cdot 1,03 = 25,75 \frac{M}{c}$$

Базовый скоростной напор по формуле 4.10 EN 1991-1-4 равен:

$$q_b = 0,5 \cdot \rho \cdot v_b^2 = 0,5 \cdot 1,226 \cdot 25,75^2 = 0,406 \text{ кПа.}$$

Пиковое значение скоростного напора согласно формуле 4.8 EN 1991-1-4:

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)] \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = [1 + 7 \cdot 0,1] \cdot 0,5 \cdot 1,226 \cdot 40,66^2 = 1722,84 \text{ Па,}$$

Итоговое ветровое усилие согласно разделу 5.3 EN 1991-1-4 равно:

$$F_w = c_s c_d c_f q_p(z) A_{ref}.$$

Следовательно, статические ветровые нагрузки для конструкций из труб на 1 п.м.: $F_w=1,02-6,38$ кН/м, для решетчатых конструкций - $F_w=0,97-6,43$ кН/м. Ветровая нагрузка прикладывалась на стержни в виде равномерно распределённой нагрузки по направлению оси Y.

В ПК Scad возможно задание ветрового воздействия с учетом пульсационной составляющей с использованием модуля «Динамические воздействия». При этом необходимо предварительно ввести и посчитать статическую ветровую нагрузку.

Согласно [3, 4] основанием для конструкций моста служат бетонные кессоны, которые располагаются под вертикальными колоннами. Так же по обе стороны моста существуют арки, которые скрывают чугунные пригрузки моста, служащие для уравнивания нагрузки от поездов и мостовых пролетов. С учетом этого закрепление конструкции было произведено наложением связей в местах крепления центральных частей консолей к каменным опорам моста. Левый и правый концы моста были закреплены от перемещений по направлению X и Y, а по Z приложены нагрузки для моделирования чугунных пригрузов, которые были равны нагрузке от веса стальных конструкций перехода.

Выполнен линейный расчет на сочетание постоянных (собственный вес конструкций) и кратковременных (ветровых) нагрузок в ПК Scad и получены результаты напряженно-деформированного состояния элементов.

Оценка деформированной схемы модели моста (рис. 10-11) показала, что максимальное вертикальное перемещение от собственного веса – 414,71 мм. Это в отношении к пролету моста, составляет менее 1:1200. Максимальное горизонтальное перемещение от

воздействия ветра – 300,1 мм (155,84 мм – перемещение от статической нагрузки ветра, 144,26 мм – перемещение от пульсационной составляющей ветра).

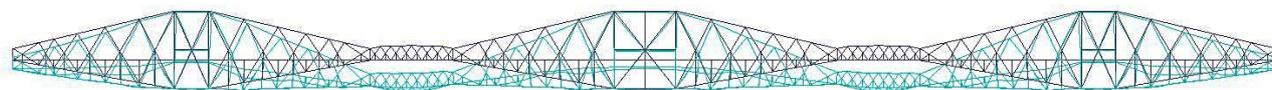


Рисунок 10. Деформированная схема моста под действием собственного веса
Figure 10. The strained diagram of bridge under the action of its own weight



Рисунок 11. Деформированная схема моста под действием ветра
Figure 11. The strained diagram of bridge under the action of wind

Произведен анализ напряженного состояния стержней. Согласно усилиям, возникающим в элементах от собственного веса, расположение сжатых и растянутых стержней соответствует линиям распределения соответственно главных сжимающих и растягивающих напряжений (рис. 12-16).

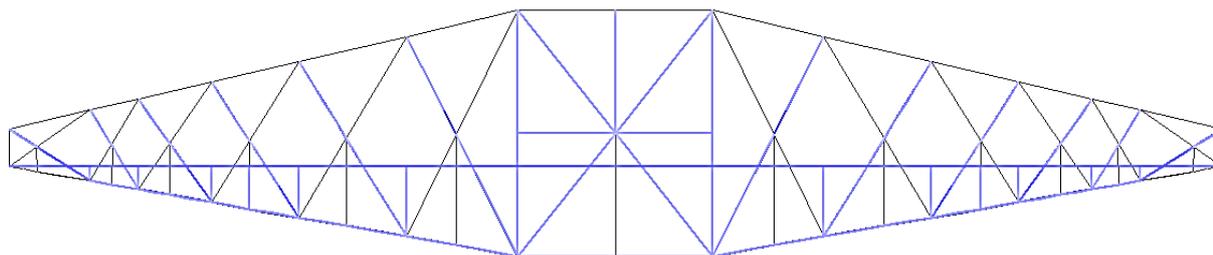


Рисунок 12. Сжатые элементы центральной части моста от собственного веса
Figure 12. The compressed elements of the central part of bridge from its own weight

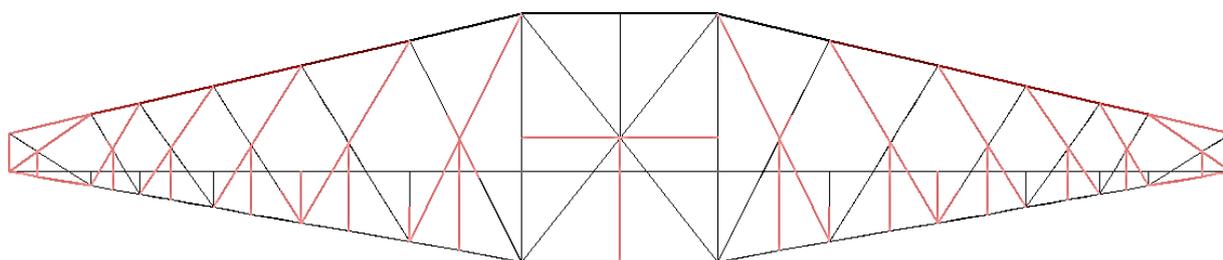


Рисунок 13. Растянутые элементы центральной части моста от собственного веса
Figure 13. Stretched elements of the central part of bridge from its own weight

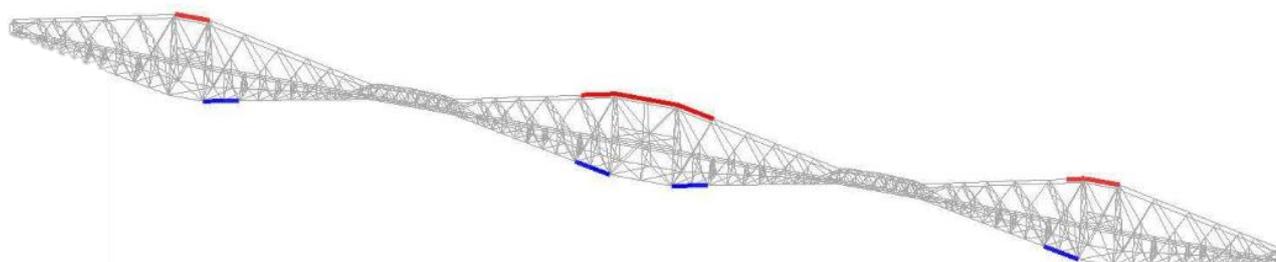


Рисунок 14. Элементы с максимальными растягивающими усилиями (выделено красным) и сжимающими (выделено синим)
Figure 14. Elements with the maximum tensile (highlighted in red) and compressive (highlighted in blue) forces

	N		
	кН	кН	
✓	-31245,21	-26456,4	1
✓	-26456,4	-21667,59	2
✓	-21667,59	-16878,78	3
✓	-16878,78	-12089,97	4
✓	-12089,97	-7301,16	1
✓	-7301,16	-2512,35	2
✓	-2512,35	2276,46	2
✓	2276,46	7065,27	1
✓	7065,27	11854,08	3
✓	11854,08	16642,89	2
✓	16642,89	21431,7	3
✓	21431,7	26220,51	1
✓	26220,51	31009,32	2
✓	31009,32	35798,13	3
✓	35798,13	40586,94	1
✓	40586,94	45375,75	1

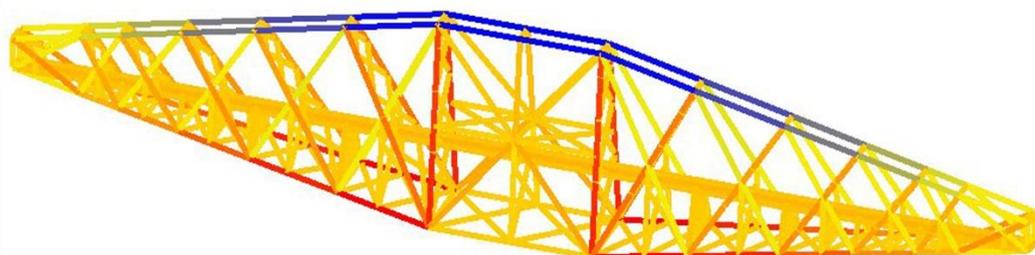


Рисунок 15. Цветовая индикация усилий от собственного веса
Figure 15. The color-coded indication of forces from its own weight

	N		
	кН	кН	
✓	-22625,86	-19796,7	3
✓	-19796,7	-16967,53	2
✓	-16967,53	-14138,36	4
✓	-14138,36	-11309,19	4
✓	-11309,19	-8480,02	3
✓	-8480,02	-5650,85	3
✓	-5650,85	-2821,68	3
✓	-2821,68	7,48	1
✓	7,48	2836,65	1
✓	2836,65	5665,82	3
✓	5665,82	8494,99	3
✓	8494,99	11324,16	3
✓	11324,16	14153,33	4
✓	14153,33	16982,5	4
✓	16982,5	19811,66	2
✓	19811,66	22640,83	3

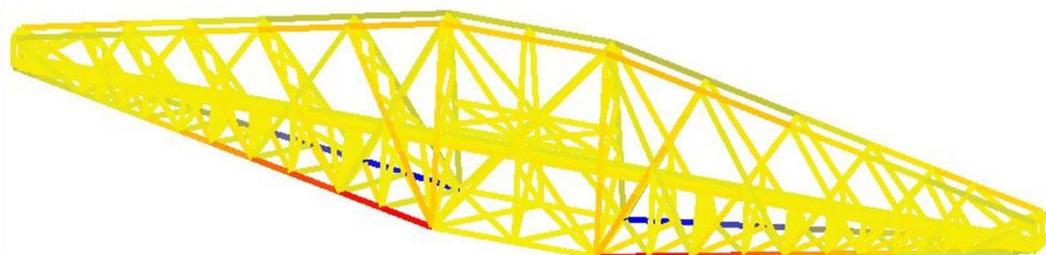
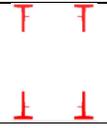
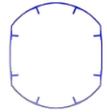
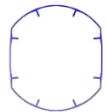
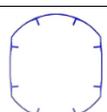
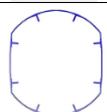


Рисунок 16. Цветовая индикация усилий от ветрового воздействия
Figure 16. The color-coded indication of forces under the action of wind

Численные значения продольного усилия представлены в таблице 1.

Таблица 1/Table 1
Внутренние усилия в элементах моста/Internal forces in the bridge elements

	№ элемента	Сечение	Поперечная площадь A , см^2	Радиус инерции, см		Продольное усилие N , кН
				i_y	i_z	
собственный вес						
Растянутый элемент	56		5419,28	154,9	94,4	45375,75
Сжатый элемент	157		2513,53	85,3	78,9	-31245,21
ветровое воздействие						
Растянутый элемент	395		2513,53	85,3	78,9	22640,83
Сжатый элемент	393		2513,53	85,3	78,9	-22625,86
от комбинации нагрузений						
Растянутый элемент	56		5419,28	154,9	94,4	51039,68
Сжатый элемент	393		2513,53	85,3	78,9	-53870,80

Определены нормальные напряжения в сечениях стержней. В максимально растянутом – 94,18 МПа, в максимально сжатом – 214 МПа.

Дополнительно был произведен ручной расчет самого напряженного элемента на устойчивость согласно СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции». Коэффициент использования по критерию устойчивости составил 0,64.

Произведен модальный анализ расчетной схемы, определены формы и частоты собственных колебаний моста. Результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 17.

Таблица 2/Table 2
Частоты собственных колебаний моста/The natural-vibration frequencies of the bridge

Форма колебаний	Собственная частота, Гц	Период, с
1	0,3	3,28
2	0,31	3,26
3	0,41	2,46

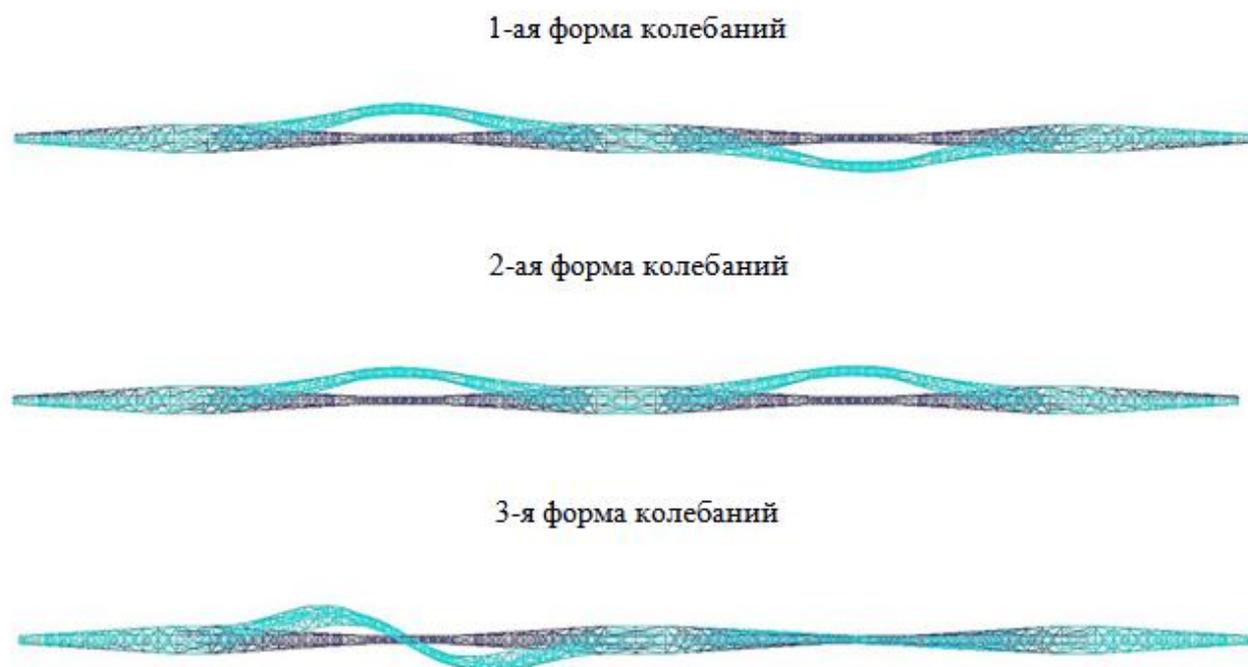


Рисунок 17. Формы колебаний конструкции моста
Figure 17. Vibration modes of the bridge structure

На основании проделанной работы можно сделать вывод, что мост Форт Рэйл Бридж обладает достаточным запасом несущей способности и отвечает требованиям современных нормативных документов.

Рассмотренный пример моделирования сооружения моста Форт Рэйл Бридж в ПК Scad подтверждает факт, что использование программных продуктов является незаменимым атрибутом при анализе и дальнейшей реконструкции существующих конструкций. Полученные результаты наглядно иллюстрируют «слабые места» или, наоборот, выявляют запасы прочности в элементах, которые позволяют минимизировать экономические затраты при реконструкции исторического объекта.

В последнее время расчеты на динамическое воздействие ветра на сооружения являются важнейшей составляющей проектирования, что делает актуальным использование компьютерного моделирования ветровых воздействий [14, 15]. Так как данный способ является менее трудозатратным и требует меньших капиталовложений по сравнению с другими методами исследования, а для сложных систем зачастую является единственным возможным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьева А.М. Железнодорожный транспорт России во второй половине XIX в. - М.: Наука, 1975. - 316 с.
2. Корнеев М.М. Стальные мосты. Теоретическое и практическое пособие по проектированию. - К.: Киев, 2003. - 547 с.- ISBN 5-838-0796-1.
3. Ефимов П.П. Архитектура мостов. - М., ФГУП "Информавтодор", 2003. - 287 с. - ISBN 5-900121-16-X.
4. The Forth Bridge. - London.: Engineering, 1890. - 152 p.
5. Игнатъев А.В. Основные формулировки метода конечных элементов в задачах строительной механики. Часть 1 // Вестник МГСУ. 2014. №11 [Электронный ресурс] - М.: НИУ МГСУ, 2014. - Режим доступа: <http://vestnikmgsu.ru/index.php/ru/archive/article/display/40/5>, свободный.
6. Скорук Л.Н. Использование вычислительного комплекса SCAD Office при реконструкции зданий и сооружений // CADmaster. 2011. №6 [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.cadmater.ru/magazin/articles/cm_61_22.html, свободный.
7. Sauts A.V., Savin S.N. Application of finite element analysis at inspection transport works (on the example of the railway bridge) // Электронный научно-практический журнал «Современные научные исследования и инновации», 2013 №4 (24) [Электронный ресурс] – М.: Международный научно-инновационный центр (ООО), 2013. - Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2013/04/23441>, свободный.
8. Едигаров Г.Э. Опыт применения ПК SCAD Office для обоснования конструктивных решений проекта реконструкции автодорожного мостового перехода через сооружения Ивановской ГЭС // CADmaster. 2012. №4 (65) [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.cadmater.ru/magazin/articles/cm_65_21.html, свободный.
9. Михайлова Л.И., Кунин Ю.С., Котов В.И. Результаты комплексного обследования моста через сооружения Ивановского гидроузла (плотину №21 и ГЭС №191) в г. Дубне // Вестник МГСУ. 2013. №11 [Электронный ресурс] - М.: НИУ МГСУ, 2013. - Режим доступа: <http://vestnikmgsu.ru/index.php/ru/archive/article/display/55/15>, свободный.
10. Маляренко А.А., Семенов А.А., Сафиуллин М.Н., Порываев И.А. Анализ напряженно-деформированного состояния моделей узлов металлических конструкций в среде SCAD // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. №3. С. 47-56.
11. Едигаров Г. Э. Опыт применения ПК SCAD Office в расчете промежуточной свайной двухрядной опоры моста с учетом взаимного влияния свай в кусте // CADmaster. 2015. №3 (82). [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.cadmater.ru/magazin/articles/cm_82_21.html, свободный.
12. R. Shreedhar, Spurti Mamadapur. Analysis of T-beam Bridge Using Finite Element Method // International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), 2012, vol. 2, i. 3.

13. Fialko S. Parallel direct solver for solving systems of linear equations resulting from finite element method on multi-core desktops and workstations // Computers and Mathematics with Applications , 2015, vol. 70, i. 12.
14. Порываев И.А., Сафиуллин М.Н., Семенов А.А. Исследование ветровой и снеговой нагрузок на покрытия вертикальных цилиндрических резервуаров // Инженерно-строительный журнал. 2012. №5. С. 12-22.
15. Дубинский С.И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. М.: МГСУ, 2010. 20 с.
16. Семенов А.А., Порываев И.А., Софоян С.В., Гилемханов Р.А., Семенов С.А. Анализ работы несущих конструкций покрытия большепролетного спортивного сооружения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №4. С. 58-81.
17. Семенов А.А., Порываев И.А., Сафиуллин М.Н. Комплекс виртуальных лабораторных работ для студентов направления «Строительство» с применением ПК SCAD // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №1. С. 4-22.

Semenov Aleksandr Aleksandrovich

Ufa state petroleum technological university, Russia, Ufa
E-mail: asfugntu@yandex.ru

Poryvaev Ilya Arkadievich

Ufa state petroleum technological university, Russia, Ufa
E-mail: iporivaev@gmail.com

Akhmetdinova Gulnara Rishatovna

Ufa state petroleum technological university, Russia, Ufa
E-mail: g.ahmetdinova@mail.ru

Analysis of the stress-strain state of the Forth Rail Bridge structures

Abstract. In the Russian and foreign practices of building design a finite-element method is widely used in the analysis of the stress-strain state of both new construction and existing structures. Of special interest is the modeling and analysis of structures, designed for objective reasons without the use of software systems, but in the meantime, presenting the historical and cultural value. The cantilever Forth Rail Bridge built from 1882 till 1890 across the bay Firth of Forth is precisely this object.

The purpose of this article is to analyze the stress-strain state of the Forth Rail Bridge on the finite-element model created using the Scad Office software system.

The following tasks were set and implemented to achieve the desired results:

1. to create a calculated finite-element model with the appropriate stiffness characteristics, bonds and loadings;
2. to calculate and get the stress-strain state of the computational model;
3. to compare the obtained results with the current regulations and to assess compliance of designs being studied with the modern standards.

This example of calculation of the Forth Rail Bridge construction in the Scad Office software system confirms that the application of software programs is indispensable when analyzing the existing buildings and structures and reconstructing them in future. The obtained results clearly illustrate the "weak spots" or, on the contrary, reveal a safety margin in the elements, which allow to minimize the economic costs when reconstructing historical objects.

Keywords: railway bridge; cantilever; finite-element method; a Scad Office software system; stress- strain state; stiffness; 3D model; load; wind forcing; piers

REFERENCES

1. Solov'eva A.M. Zhelezнодорожный транспорт России во второй половине XIX в. - М.: Наука, 1975. - 316 с.
2. Korneev M.M. Stal'nye mosty. Teoreticheskoe i prakticheskoe posobie po proektirovaniyu. - K.: Kiev, 2003. - 547 s.- ISBN 5-838-0796-1.
3. Efimov P.P. Arkhitektura mostov. - M., FGUP "Informavtodor", 2003. - 287 s. - ISBN 5-900121-16-Kh.
4. The Forth Bridge. - London.: Engineering, 1890. - 152 p.
5. Ignat'ev A.V. Osnovnye formulirovki metoda konechnykh elementov v zadachakh stroitel'noy mekhaniki. Chast' 1 // Vestnik MGSU. 2014. №11 [Elektronnyy resurs] - M.: NIU MGSU, 2014. - Rezhim dostupa: <http://vestnikmgsu.ru/index.php/ru/archive/article/display/40/5>, svobodnyy.
6. Skoruk L.N. Ispol'zovanie vychislitel'nogo kompleksa SCAD Office pri rekonstruktsii zdaniy i sooruzheniy // CADmaster. 2011. №6 [Elektronnyy resurs] - Rezhim dostupa: http://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_61_22.html, svobodnyy.
7. Sauts A.V., Savin S.N. Application of finite element analysis at inspection transport works (on the example of the railway bridge) // Elektronnyy nauchno-prakticheskiy zhurnal «Sovremennyye nauchnye issledovaniya i innovatsii», 2013 №4 (24) [Elektronnyy resurs] – M.: Mezhdunarodnyy nauchno-innovatsionnyy tsentr (OOO), 2013. - Rezhim dostupa: <http://web.snauka.ru/issues/2013/04/23441>, svobodnyy.
8. Edigarov G.E. Opyt primeneniya PK SCAD Office dlya obosnovaniya konstruktivnykh resheniy proekta rekonstruktsii avtodorozhnogo mostovogo perekhoda cherez sooruzheniya Ivan'kovskoy GES // CADmaster. 2012. №4 (65) [Elektronnyy resurs] - Rezhim dostupa: http://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_65_21.html, svobodnyy.
9. Mikhaylova L.I., Kunin Yu.S., Kotov V.I. Rezul'taty kompleksnogo obsledovaniya mosta cherez sooruzheniya Ivan'kovskogo gidrouzla (plotinu №21 i GES №191) v g. Dubne // Vestnik MGSU. 2013. №11 [Elektronnyy resurs] - M.: NIU MGSU, 2013. - Rezhim dostupa: <http://vestnikmgsu.ru/index.php/ru/archive/article/display/55/15>, svobodnyy.
10. Malyarenko A.A., Semenov A.A., Safiullin M.N., Poryvaev I.A. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya modeley uzlov metallicheskiy konstruktsiy v srede SCAD // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 2013. №3. S. 47-56.
11. Edigarov G. E. Opyt primeneniya PK SCAD Office v raschete promezhutochnoy svaynoy dvukhryadnoy opory mosta s uchetom vzaimnogo vliyaniya svay v kuste // CADmaster. 2015. №3 (82). [Elektronnyy resurs] - Rezhim dostupa: http://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_82_21.html, svobodnyy.
12. R. Shreedhar, Spurti Mamadapur. Analysis of T-beam Bridge Using Finite Element Method // International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), 2012, vol. 2, i. 3.
13. Fialko S. Parallel direct solver for solving systems of linear equations resulting from finite element method on multi-core desktops and workstations // Computers and Mathematics with Applications, 2015, vol. 70, i. 12.

14. Poryvaev I.A., Safiullin M.N., Semenov A.A. Issledovanie vetrovoy i snegovoy nagruzok na pokrytiya vertikal'nykh tsilindricheskikh rezervuarov // Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal. 2012. №5. S. 12-22.
15. Dubinskiy S.I. Chislennoe modelirovanie vetrovykh vozdeystviy na vysotnye zdaniya i komplekсы. Avtoreferat diss. ... kand. tekhn. nauk. M.: MGSU, 2010. 20 s.
16. Semenov A.A., Poryvaev I.A., Sofoyan S.V., Gilemkhanov R.A., Semenov S.A. Analiz raboty nesushchikh konstruktsiy pokrytiya bol'sheproletnogo sportivnogo sooruzheniya // Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy. 2015. №4. S. 58-81.
17. Semenov A.A., Poryvaev I.A., Safiullin M.N. Kompleks virtual'nykh laboratornykh rabot dlya studentov napravleniya «Stroitel'stvo» s primeneniem PK SCAD // Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy. 2014. №1. S. 4-22.