

УДК 624.3

В.А. ХодяковБелорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь**ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФЕРМ
НЕРАЗРЕЗНОГО ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ**

Представлены результаты дипломного проектирования реконструкции моста через реку Свислочь по ул. Янки Купалы в городе Минске. Причиной реконструкции послужило отсутствие пешеходных проходов под мостом, что затрудняло движение гуляющих по набережной реки. Кроме того, мост разрезает существующую велодорожку, которая также проходит по набережной реки. В результате изучения существующей ситуации было принято решение реконструировать транспортный узел целиком, с полным демонтажем существующих конструкций моста.

Произведен расчет и оптимизация всех несущих металлических конструкций пролетного строения. Особый акцент в статье сделан на результаты оптимизации главных неразрезных пятипролетных ферм. Оптимизация проводилась с использованием программных продуктов Rhinoceros, Grasshopper и Karamba, ее результаты проверялись в расчетном комплексе SOFiSTiK. Целью оптимизации стало уменьшение расхода материала на производство ферм с учетом сохранения несущей способности.

В результате была получена несимметричная неразрезная пятипролетная ферма со сложными очертаниями поясов. Приведены огибающие эпюры коэффициентов использования материалов для четырех вариантов загрузки, на основе которых производилась оптимизация. Также приведена таблица результатов оптимизации с геометрическими местами узлов ферм.

Структура полученной фермы, по результатам оптимизации, позволила сэкономить материалы на ее производство, получила большую архитектурную выразительность и теперь может существовать как самостоятельный архитектурный объект. Рассмотрены общие особенности конструкции полученной фермы.

Описаны общие алгоритмы и принципы оптимизации несущих конструкций. Проанализированы модели работы алгоритмов оптимизации.

Ключевые слова: оптимизация, мост, ферма, пролетное строение, расчет, rhinoceros, grasshopper, karamba, sofiistik, архитектура, вычислительное проектирование.

V.A. Khodiakov

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

**STEEL TRUSSES OPTIMIZATION
OF NOT CUTTING SPAN STRUCTURE**

The work is based on the results of graduate's design reconstruction of the bridge over the river Svisloch on Yanka Kupala street, Minsk city. The reconstruction reason was the absence of pedestrian passes under the bridge, which make it difficult for people's movement along the embankment of the river. In addition the bridge cut existing bicycle lane, which also pass on the embankment of the river. A learning of the current situation was decided to reconstruct the entire transport hub with a complete dismantling of the existing bridge structure.

Calculation and optimization were made all metal carrying structures of the bridge. Particular emphasis in the article is made on the main results of the not cutting truss optimization. Optimization was made by Rhinoceros, Grasshopper and Karamba computer programs. Results of optimization were

checked in SOFiSTiK. The reasons for optimization were reduce the consumption of material for truss production, taking into account the carrying capacity saving.

The result was a not cutting, asymmetrical truss with complex belts contours. Were showed envelope utilization level diagrams for the four loading options. Also, were showed results table with the location of the nodes farms.

The truss structure gets a lot more architectural expressiveness. Was described the general design features of the resulting truss.

The article describes the general optimization's algorithms principles for bearing structures. Models of algorithms optimization were described.

Keywords: optimization, bridge, truss, span, calculation, rhinoceros, grasshopper, karamba, sofistik, architecture, computational design.

Введение

В рамках дипломного проектирования был разработан проект реконструкции моста через р. Свислочь по ул. Янки Купалы в г. Минске. Основной причиной реконструкции моста стало отсутствие пешеходных проходов по набережной р. Свислочь под сооружением. Это единственный мост, находящийся в уникальном водно-зеленом диаметре г. Минска, который невозможно пересечь, не уходя с набережной. Кроме того, установленные на перекрестке улиц Интернациональная и Янки Купалы светофоры затрудняют движение как пешеходов, так и автотранспорта. Это приводит к образованию пробок, в том числе на мосту (рис. 1).



Рис. 1. Схема района реконструируемого моста. Источник Google Maps

В ходе проектирования была поставлена задача – поднятие мостового полотна для обеспечения проходов по набережной под сооружением. При этом требовалось максимально сохранить уже существующие объекты в районе моста.

После решения комплексной архитектурно-планировочной задачи планировалось проведение оптимизации всех основных несущих конструкций моста, в том числе стальной неразрезной пяти пролетной фермы.

Новый мост проектировался по схеме $42 + 9 + 42 + 9 + 42$. Он включал два больших береговых пролета, два малых береговых пролета и один большой русловой пролет. Продольный профиль моста был поднят на 2,5 м. Это позволило пропустить под двумя малыми береговыми пролетами тротуар и велодорожку (рис. 2, 3).



Рис. 2. Общий вид на мост до реконструкции



Рис. 3. Общий вид на мост после реконструкции

1. Теория оптимизации

Для несложных задач с малым количеством параметров можно составлять несколько вариантов конструкций, анализируя и с каждым новым вариантом постепенно приближая их к наилучшим технико-экономическим показателям (далее – ТЭП). Для более сложных задач

зачастую существует несколько вариантов оптимальных ТЭП, к которым можно прийти методом последовательного приближения [1, 2]. Но нахождение всех этих минимумов простым подбором – довольно сложная задача. Кроме того, метод последовательных приближений при большом количестве входных параметров дает огромное количество их сочетаний, анализ которых даже при одной итерации требует сложных вычислений или длительной работы компьютера [3, 4].

Для облегчения процесса подбора предлагается использовать два алгоритма: модель эволюции Дарвина и модель остывания вещества до абсолютного нуля [5, 6].

При использовании обоих алгоритмов всегда оставляем шанс на обнаружение того, что данное направление приближения неверно и при принципиально другой комбинации параметров существует другое, лучшее решение – другой оптимальный ТЭП.

В 3D-редакторе Rhinoceros существует параметрический плагин Grasshopper (рис. 4), используя который можно довольно удобно автоматизировать процесс подбора вариантов конфигурации конструкции. В качестве плагина к Grasshopper разработана программа Karamba, которая может рассчитывать конструкции с использованием метода конечных элементов. Karamba является наиболее приемлемой программой, когда требуется оптимизировать ТЭП несущей конструкции. Вся система моделирования и расчета в Grasshopper построена на использовании узлов (небольших элементарных функций) и определении между ними логических связей.

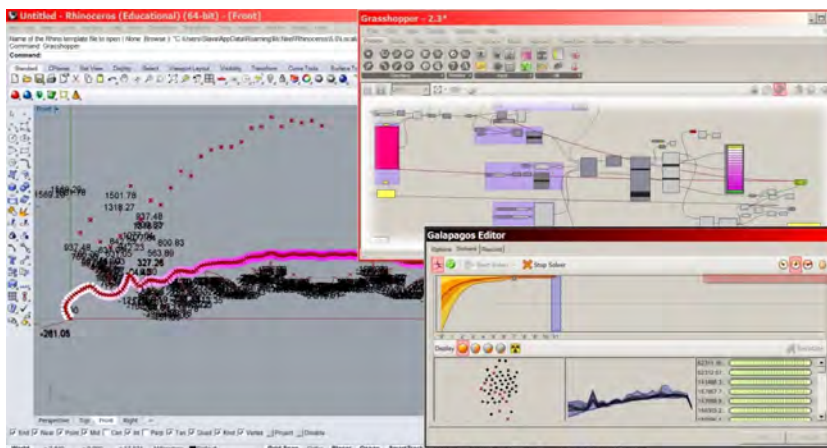


Рис. 4. Рабочее пространство 3D-редактора Rhinoceros с использованием плагина Grasshopper

Фактически Grasshopper является языком программирования, который перенесен из текстовой формы в нодовую, что облегчает его использование людьми, не знакомыми с языками программирования.

Главной и наиболее интересной функцией является нод Galapagos, который позволяет оптимизировать некоторые параметры, моделируя алгоритмы дарвиновской эволюции и остывания вещества до абсолютного нуля.

У нода существует два логических входа: Genome (Геном) и Fitness (Приспособленность). В качестве параметра приспособленности эффективно задавать минимальную массу несущей конструкции [6, 7]. Геномом же могут являться геометрические параметры конструкции. Дополнительным условием оптимизации является сохранение конструкцией несущей способности [8, 9].

Алгоритм, использующий модель дарвиновской эволюции, более сложен. Каждый из построенных в процессе оптимизации видов конструкции выступает в качестве особи со своим набором генов – геномом.

В каждом поколении «рождается» некоторое количество «особей» конструкций. Каждая «особь» имеет свой набор генов, в какой-то степени отличающийся от генов предыдущего поколения. Если «особь» сильно отдалается от условия приспособленности, то погибает и ген, носителем которого она является, отсеивается вместе с ней как неэффективный. В результате выживают наиболее приспособленные «организмы» конструкции.

Важным является то, что если одна особь получила ген, сильно отличающийся от абсолютного большинства своих сородичей в лучшую сторону, то она начинает переманивать весь процесс эволюции на себя. Таким образом, в очень сложных задачах никогда нельзя быть уверенным, что эволюция пошла в правильном направлении. Всегда может появиться «особь», которая «выпрыгнет» из общей массы и перетянет весь процесс на себя. Однако процесс оптимизации можно считать завершенным, когда несколько сотен поколений не обнаруживается следующая «особь» с лучшим геном.

Алгоритм, использующий модель остывания вещества до абсолютного нуля, проще. В его основе лежит стабилизация молекул вещества в некотором положении равновесия при температуре абсолютного нуля.

Наши параметры (геном) можно представить как некоторое количество колеблющихся молекул, взаимодействующих между собой. При остывании этой группы молекул они занимают между собой одно

из наиболее стабильных положений, которое и является одним из наших искомым минимумов.

Для разных задач может быть наиболее эффективен как один, так и другой алгоритм, а иногда их последовательное применение. Например, алгоритм остывания вещества быстро находит несколько направлений наиболее подходящих комбинаций параметров, а окончательную, единственно оптимальную комбинацию лучше ищет алгоритм дарвиновской эволюции.

2. Оптимизация и расчет главных ферм

Расчет главных ферм пролетного строения выполнялся с использованием программного комплекса SOFiSTiK. Оптимизация конструкций производилась с использованием компьютерных программ Rhinoceros, Grasshopper и Karamba.

В целях упрощения задачи было принято решение унифицировать неразрезные фермы поперек пролетного строения. Для расчета и оптимизации была выбрана наиболее нагруженная ферма.

Основными стали нормативные нагрузки А14 и НК112. Однако результаты предварительных расчетов показали, что нагрузка АК оказывает менее благоприятное воздействие на конструкцию, чем НК112. По итогу расчет по нагрузке НК112 не проводился.

Нагрузки были приложены в виде четырех серий загрузений:

1. Прокатывание тележки АК по всем пролетам. Распределенная нагрузка приложена по всей длине пролетного строения.
2. Прокатывание тележки АК по первому пролету. Распределенная нагрузка приложена по всей длине первого пролета.
3. Прокатывание тележки АК по третьему пролету. Распределенная нагрузка приложена по всей длине третьего пролета.
4. Прокатывание тележки АК по пятому пролету. Распределенная нагрузка приложена по всей длине пятого пролета.

Материал для производства главных ферм пролетного строения принят в виде стали марки 10ХСНД, класса прочности С390, с расчетным сопротивлением 350 МПа.

Сечение верхнего пояса представляет собой сварное сечение из двух уголков 200×200×16 мм и стального листа 600×30 мм (рис. 5).

Сечение нижнего пояса представляет собой сварное сечение из двух уголков 200×200×24 мм и стального листа 420×30 мм (рис. 6).

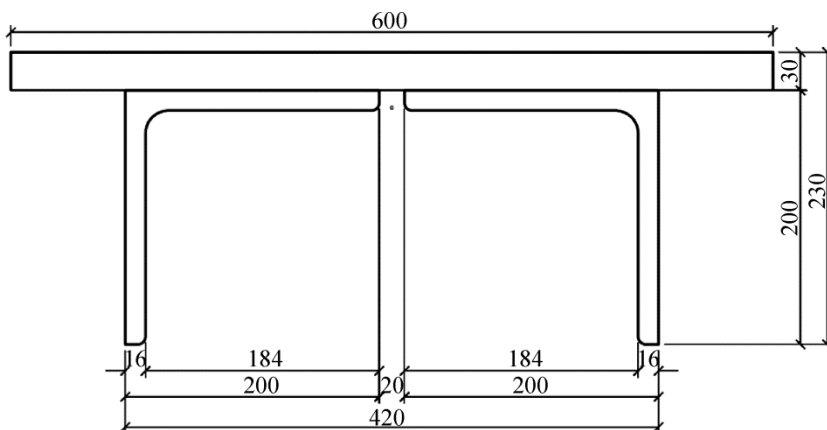


Рис. 5. Схема конструкции сечения верхнего пояса

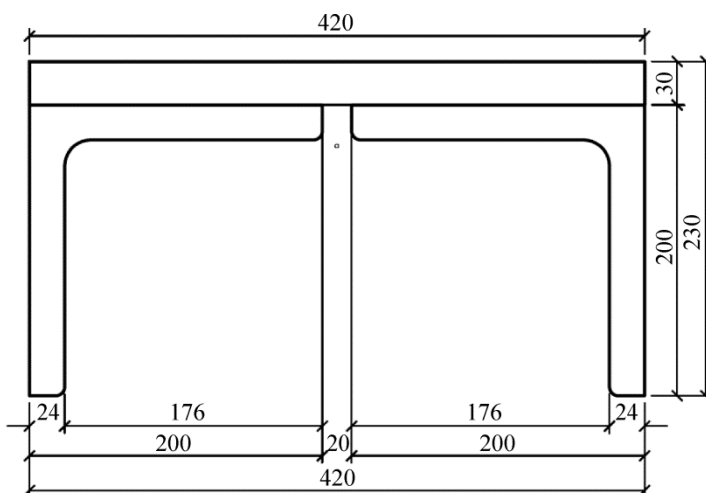


Рис. 6. Схема конструкции сечения нижнего пояса

Сечения ферм подобраны с конструктивной точки зрения и максимально одинакового поперечного сечения.

Раскосы ферм приняты в виде пар прокатных уголков $150 \times 150 \times 12$ мм.

Проектирование главных ферм пролетного строения предполагало оптимизацию их строительной высоты до получения коэффициента использования по материалу, близкому к единице на протяжении всей длины поясов фермы и в раскосах [10–12]. При этом требовалось затратить наименьшее количество материала на изготовление фермы.

Второй и четвертый пролеты фермы не оптимизировались, они были введены вручную для обеспечения минимального габарита под ними для пропуска тротуара и велодорожки.

Ферма имела шарнирное опирание во всех узлах. Только крайние опорные части моделировались шарнирно-подвижными. Предполагалось, что температурные деформации во втором, третьем и четвертом пролетах будут компенсироваться строительной высотой фермы. Все раскосы фермы крепились к поясам шарнирно.

Был составлен алгоритм оптимизации фермы, оптимизирующий строительную высоту фермы в каждом из ее узлов. При этом производился параллельный расчет 136 загрузений фермы. Одна расчетная итерация занимала 3–4 с, что очень быстро, учитывая, что при одной итерации производился анализ 136 статически неопределимых расчетных схем из 295 стержневых элементов в каждой. Всего для полной оптимизации фермы понадобилось несколько сотен тысяч итераций.

При оптимизации отметки узлов верхнего пояса фермы были постоянными. Для сохранения очертания продольного профиля трассы сооружения оптимизировались только отметки узлов нижнего пояса.

Первоначально планировалось оптимизировать треугольную раскосную систему со стойками и подвесками. Однако определение нисходящих и восходящих положений раскосов излишне усложняло алгоритм оптимизации. Поэтому было принято решение убрать стойки и подвески, оставив обычную треугольную систему раскосов.

По результатам оптимизации были получены геометрические места узлов фермы (рис. 7). Разности отметок между осями нижнего и верхнего поясов фермы сведены в таблицу. При вычислении отметок за ноль принята опорная часть № 2 по оси нижнего пояса фермы.

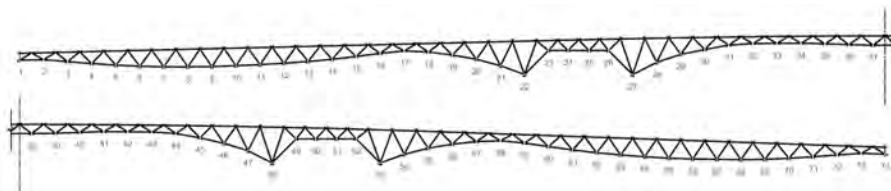


Рис. 7. Нумерация оптимизируемых узлов фермы

Оптимизированные главные фермы пролетного строения в качестве проверки были рассчитаны в программном комплексе SOFiSTiK (рис. 8). По результатам расчета были получены эпюры коэффициентов использования материала (рис. 9–12). Следует отметить, что все загрузки прикладывались в качестве подвижной нагрузки, и как при оптимизации, так и при расчете в SOFiSTiK к расчету принимались огибающие эпюры усилий.

Разности отметок между осями нижнего и верхнего поясов фермы

Номер узла	Расстояние от начала фермы до узла, м	Отметка оси верхнего пояса, м	Отметка оси нижнего пояса, м	Высота фермы в осях поясов, м	Строительная высота фермы, м	Номер узла	Расстояние от начала фермы до узла, м	Отметка оси верхнего пояса, м	Отметка оси нижнего пояса, м	Высота фермы в осях поясов, м	Строительная высота фермы, м
1	0,000	1,196	1,766	0,570	0,785	38	73,000	2,448	3,209	0,761	0,976
2	2,000	1,244	1,814	0,570	0,786	39	75,000	2,471	3,205	0,734	0,949
3	4,000	1,078	1,862	0,784	1,000	40	77,000	2,549	3,197	0,648	0,863
4	6,000	0,914	1,910	0,996	1,212	41	79,000	2,615	3,185	0,570	0,785
5	8,000	0,784	1,958	1,174	1,390	42	81,000	2,599	3,169	0,570	0,785
6	10,000	0,696	2,007	1,311	1,526	43	83,000	2,579	3,149	0,570	0,785
7	12,000	0,646	2,055	1,409	1,624	44	85,000	2,453	3,125	0,672	0,890
8	14,000	0,639	2,103	1,464	1,679	45	87,000	2,094	3,097	1,003	1,222
9	16,000	0,664	2,151	1,487	1,702	46	89,000	1,635	3,065	1,430	1,653
10	18,000	0,734	2,199	1,465	1,680	47	91,000	1,021	3,029	2,008	2,244
11	20,000	0,829	2,247	1,418	1,634	48	93,000	0,000	2,989	2,989	3,073
12	22,000	0,944	2,296	1,352	1,568	49	95,000	2,000	2,945	0,945	1,232
13	24,000	1,090	2,344	1,254	1,470	50	96,625	2,000	2,906	0,906	1,122
14	26,000	1,268	2,392	1,124	1,340	51	98,375	2,000	2,862	0,862	1,077
15	28,000	1,508	2,440	0,932	1,149	52	100,000	2,000	2,818	0,818	1,104
16	30,000	1,762	2,488	0,726	0,943	53	102,000	0,000	2,759	2,759	2,843
17	32,000	1,967	2,537	0,570	0,786	54	104,000	0,722	2,697	1,975	2,202
18	34,000	1,871	2,585	0,714	0,931	55	106,000	1,232	2,631	1,399	1,620
19	36,000	1,631	2,633	1,002	1,220	56	108,000	1,569	2,562	0,993	1,211
20	38,000	1,271	2,681	1,410	1,631	57	110,000	1,776	2,492	0,716	0,932
21	40,000	0,737	2,729	1,992	2,219	58	112,000	1,853	2,423	0,570	0,786
22	42,000	0,000	2,777	2,777	2,861	59	114,000	1,655	2,353	0,698	0,915
23	44,000	2,000	2,826	0,826	1,112	60	116,000	1,368	2,283	0,915	1,132
24	45,625	2,000	2,865	0,865	1,080	61	118,000	1,082	2,213	1,131	1,347
25	47,375	2,000	2,907	0,907	1,122	62	120,000	0,855	2,143	1,288	1,504
26	49,000	2,000	2,945	0,945	1,232	63	122,000	0,668	2,073	1,405	1,621
27	51,000	0,000	2,989	2,989	3,073	64	124,000	0,518	2,003	1,485	1,701
28	53,000	1,015	3,029	2,014	2,250	65	126,000	0,398	1,933	1,535	1,750
29	55,000	1,686	3,065	1,379	1,603	66	128,000	0,333	1,863	1,530	1,745
30	57,000	2,079	3,097	1,018	1,236	67	130,000	0,302	1,794	1,492	1,707
31	59,000	2,453	3,125	0,672	0,890	68	132,000	0,281	1,724	1,443	1,658
32	61,000	2,579	3,149	0,570	0,785	69	134,000	0,303	1,654	1,351	1,566
33	63,000	2,599	3,169	0,570	0,785	70	136,000	0,393	1,584	1,191	1,407
34	65,000	2,613	3,185	0,572	0,787	71	138,000	0,518	1,514	0,996	1,212
35	67,000	2,561	3,197	0,636	0,851	72	140,000	0,668	1,444	0,776	0,992
36	69,000	2,493	3,205	0,712	0,927	73	142,000	0,804	1,374	0,570	0,786
37	71,000	2,441	3,209	0,768	0,983	74	144,000	0,734	1,304	0,570	0,785



Рис. 8. Общий вид работы рассчитываемой главной фермы пролетного строения в программном комплексе SOFiSTiK. Загружение всех пролетов моста

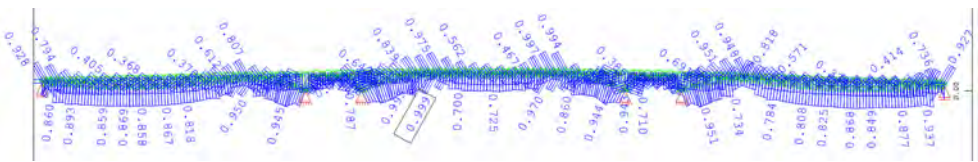


Рис. 9. Эпюра коэффициента использования материала главной фермы пролетного строения. Загружение всех пролетов моста

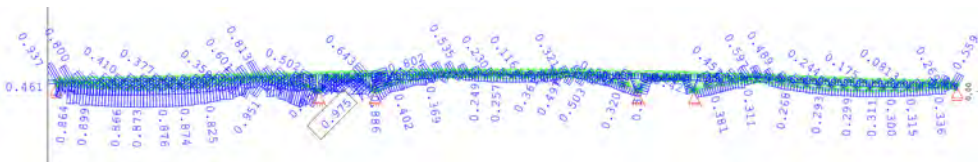


Рис. 10. Эпюра коэффициента использования материала главной фермы пролетного строения. Загружение первого пролета моста

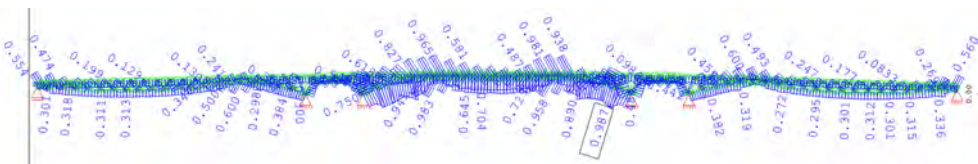


Рис. 11. Эпюра коэффициента использования материала главной фермы пролетного строения. Загружение третьего пролета моста

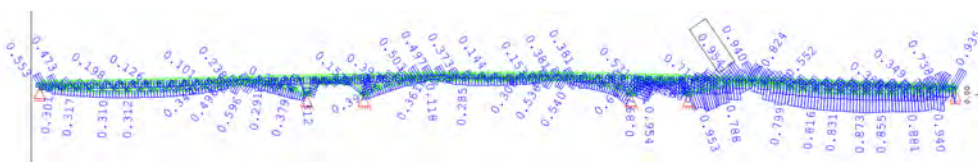


Рис. 12. Эпюра коэффициента использования материала главной фермы пролетного строения. Загружение пятого пролета моста

При расчете было принято решение разделить раскосы на две группы в зависимости от их загруженности с целью экономии материала. Одна часть раскосов была заменена на более крупные уголки 150×150×15 мм. Другая часть раскосов была заменена на более мелкие уголки 100×100×12 мм.

3. Анализ результатов и выводы

По результатам проверочного расчета главной фермы пролетного строения, несущая способность была сохранена. Максимальный коэффициент использования материала составил 0,999. По результатам расчета обнаружались незначительные отклонения коэффициентов использования материала в расчетах Karamba и SOFiSTiK. Это можно объяснить тем, что часть недогруженных стержней была заменена на более тонкие, что изменило жесткость системы. При расчете было изменено положение одного из узлов нижнего пояса фермы. В области этого узла было единственное нарушение несущей способности. После изменения высоты положение узла на 20 мм несущая способность была восстановлена.

Следует отметить, что запроектировать симметричную ферму не представлялось возможным, так как продольный уклон береговых пролетов был разным. Это повысило сложность оптимизируемой задачи в два раза. По результатам можно заметить, что, действительно, строительная высота береговых пролетов ощутимо разнится, поскольку ферма неразрезная и представляет собой цельную систему, можно заметить, что центральный пролет тоже имеет асимметрию.

В процессе работы можно было наблюдать интересное свойство оптимизированной неразрезной фермы. Если какой-либо из узлов сдвинуть хотя бы на миллиметр вверх или вниз, то сразу же наблюдается перегруз одного из стержней фермы. При этом следует отдельно отметить два факта. Во-первых, если перемещать узел по высоте в одном конце фермы, то перегруз часто возникает не в месте перемещаемого узла, а совсем на другом конце фермы. Во-вторых, если даже перемещать узел в сторону увеличения строительной высоты, это также ведет к появлению перегрузов стержней. Это говорит о тесной взаимосвязи всех элементов фермы и уникальности результатов оптимизации. Другими словами, достичь такого результата ручным итерационным подбором невозможно. Задача нелинейная и имеет очень сложную структуру зависимостей, практически не поддающуюся описанию.

Особенностью данной фермы также является ее расположение на вертикальной кривой. При этом продольный профиль проезжей части формируется очертанием самого верхнего пояса.

В процессе комплексного проектирования моста было решено огромное количество сложных архитектурно-планировочных задач. Была произведена оптимизация и расчет ортотропных плит и главных ферм пролетного строения. Экономия объемов материала составила от 10 до 50 % для разных элементов несущих конструкций. Были запроектированы все узлы крепления раскосов к поясам фермы, а также узлы опирания фермы.

Кроме того, получившаяся в результате оптимизации пятипролетная неразрезная ферма приобрела высокую архитектурную выразительность. Все ее элементы расположены гармонично, в соответствии с логикой расчетной схемы моста. Такая ферма вполне может существовать как самостоятельный архитектурный объект и не требует какой-либо дополнительной доработки архитектором.

Интересным вопросом, который не был принят во внимание в данной работе, является анализ жесткости фермы. Этот вопрос не менее актуален [13–15] и требует отдельного рассмотрения в дальнейших работах по оптимизации.

Рассмотренные подходы и алгоритмы также могут применяться при разработке проектов усиления уже существующих ферм [16] и других конструкций.

Список литературы

1. Зинькова В.А. Динамика рационализации структуры ферм // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова: юбил. междунар. науч.-практ. конф., посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова, XXI научные чтения. – Белгород: Изд-во Белгор. гос. техн. ун-та им. В.Г. Шухова, 2014. – С. 25–28.
2. Черняев А.А. Расчет и оптимизация плоских элементов конструкций геометрическими методами строительной механики // Проблемы оптимального проектирования сооружений: докл. 3-й Всерос. конф. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. арх.-стр. ун-та, 2014. – С. 432–436.
3. Бойко О.С., Вязова С.О. Оптимизация схемы фермы при помощи диаграммы Максвелла – Кремоны // Избр. докл. 60-й универ. науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых. – Томск: Изд-во Томск. гос. арх.-стр. ун-та, 2015. – С. 49–54.

4. Дмитриева Т.Л., Ле Ч.М.Д. Использование программного комплекса Ansys для решения задач оптимизации ферм // Проблемы оптимального проектирования сооружений: докл. 3-й Всерос. конф. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. арх.-стр. ун-та, 2014. – С. 128–135.

5. Алексейцев А.В. Эволюционная оптимизация стальных ферм с учетом узловых соединений стержней // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 5(40). – С. 27–37.

6. Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Оптимизация металлических конструкций путем эволюционного моделирования. – М.: Изд-во АСВ, 2012. – 239 с.

7. Юрьев А.Г. Естественный фактор оптимизации топологии конструкций // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 5. – С. 46–48.

8. Киселев В.Г. Оптимизация по массе фермы Шмита с тремя параметрами // Проблемы прочности и пластичности. – 2015. – № 1. – С. 93–103.

9. Китов Ю.П., Ватуля Г.Л., Веревичева М.А. Некоторые соображения о критериях оптимальности // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. – 2015. – С. 111–114.

10. Марутян А.С. Оптимизация минимальных высот стропильных и перекрестных стальных ферм, включая типа «Пятигорск» // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – № 2(253). – С. 60–66.

11. Наумов А.Е. К вопросу оптимизации топологии трехшарнирной фермы при ветровой нагрузке // Научные труды Sworld. – Одесса, 2014. – № 2. – С. 44–47.

12. Зинькова В.А. Оптимизация топологии металлических ферм // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 2. – С. 37–40.

13. Кужелев П.А. Оптимизация прогиба плоской балочной фермы // Вопросы образования и науки: теоретический и методический аспекты: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов: Изд-во ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. – С. 109–110.

14. Каледин В. О. Оптимизация анизотропных сетчатых конструкций из композиционных материалов с ограничениями по прочно-

сти, жесткости и устойчивости // Проблемы оптимального проектирования сооружений: докл. 3-й Всерос. конф. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. арх.-стр. ун-та, 2014. – С. 190–197.

15. Болдырев А. В. Топологическая оптимизация силовых конструкций с учетом требований жесткости и устойчивости // Проблемы оптимального проектирования сооружений: доклады 3-й Всерос. конф. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. арх.-стр. ун-та, 2014. – С. 56–63.

16. Алексейцев А.В. Оптимальный структурно-параметрический синтез систем усиления металлических ферм // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2013. – № 2 (2). – С. 37–46.

References

1. Zin'kova V.A. Dinamika ratsionalizatsii struktury ferm [Dynamics of rationalization of structure of truss]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta imeni V.G. Shukhova: iubileinaia mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia, posviashchennaia 60-letiiu BGTU im. V.G. Shukhova, XXI nauchnye chteniia*. Belgorod: Belgorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni V.G. Shukhova, 2014, pp. 25-28.

2. Cherniaev A.A. Raschet i optimizatsiia ploskikh elementov konstruktсии geometricheskimi metodami stroitel'noi mekhaniki [Calculation and optimization of flat elements of designs by geometrical methods of construction mechanics]. *Doklady 3-i Vserossiiskoi konferentsii "Problemy optimal'nogo proektirovaniia sooruzhenii"*. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2014, pp. 432-436.

3. Boiko O.S., Viazova S.O. Optimizatsiia skhemy fermy pri pomoshchi diagrammy Maksvella – Kremony [Optimization of the scheme of a farm by means of Maxwell's – Cremona chart]. *Izbrannye doklady 60-i universitetskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh*. Tomsk: Tomskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2015, pp. 49-54.

4. Dmitrieva T.L., Le Ch.M.D. Ispol'zovanie programmno kompleksa Ansys dlia resheniia zadach optimizatsii ferm [Use of the program Ansys complex for the solution of problems of optimization of truss]. *Doklady 3-i Vserossiiskoi konferentsii "Problemy optimal'nogo proektirovaniia sooruzhenii"*. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2014, pp. 128-135.

5. Alekseitsev A.V. Evoliutsionnaia optimizatsiia stal'nykh ferm s uchetom uzlovykh soedinenii sterzhnei [Optimal size-and-shape synthesis of system of strengthening of steel trusses]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*, 2013, no. 5(40), pp. 27–37.

6. Serpik I.N., Alekseitsev A.V. Optimizatsiia metallicheskiikh konstruksii putem evoliutsionnogo modelirovaniia [Optimization of metal structures by evolutionary modeling]. Moscow: Assotsiatsiia stroitel'nykh vuzov, 2012, 239 p.

7. Iur'ev A.G. Estestvennyi faktor optimizatsii topologii konstruksii [Natural factor of optimization of topology of designs]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta imeni V.G. Shukhova*, 2013, no. 5, pp. 46-48.

8. Kiselev V.G. Optimizatsiia po masse fermy Shmita s tremia parametrami [Optimization of mass for Schmit truss with three parameters]. *Problemy prochnosti i plastichnosti*, 2015, no. 1, pp. 93-103.

9. Kitov Iu.P., Vatulia G.L., Verevicheva M.A. Nekotorye soobrazheniia o kriteriiakh optimal'nosti [Some reasons about criteria of an optimality]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: "Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse"*: Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2015, pp. 111-114.

10. Marutian A.S. Optimizatsiia minimal'nykh vysot stropil'nykh i perekrestnykh stal'nykh ferm, vkluchaia tipa "Piatigorsk" [Optimization of the minimum heights of rafter and cross steel truss, including the Pyatigorsk type]. *Stroitel'naia mekhanika i raschet sooruzhenii*, 2014, no. 2 (253), pp. 60-66.

11. Naumov A.E. K voprosu optimizatsii topologii trekhsharnirnoi fermy pri vetrovoi nagruzke [To a question of optimization of topology of a three-hinged truss at wind loading d]. *Nauchnye trudy Sworld*, 2014, no. 2, pp. 44-47.

12. Zin'kova V.A. Optimizatsiia topologii metallicheskiikh ferm [Optimization of topology of metal truss]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta imeni V.G. Shukhova*, 2015, no. 2, pp. 37-40.

13. Kuzhelev P.A. Optimizatsiia progiba ploskoi balochnoi fermy [Optimization of a deflection of a flat frame truss]. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Voprosy obrazovaniia i nauki: teoreticheskii i metodicheskii aspekty"*. Tambov: OOO "Konsaltingovaia kompaniia Iukom", 2014, pp. 109-110.

14. Kaledin V.O. Optimizatsiia anizogridnykh setchatykh konstrukttsii iz kompozitsionnykh materialov s ogranicheniiami po prochnosti, zhestkosti i ustoichivosti [Optimization the anizogridnykh of mesh designs from composite materials with restrictions on durability, rigidity and stability]. *Doklady 3-i Vserossiiskoi konferentsii "Problemy optimal'nogo proektirovaniia sooruzhenii"*. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2014, pp. 190-197.

15. Boldyrev A.V. Topologicheskaiia optimizatsiia silovykh konstrukttsii s uchetom trebovaniy zhestkosti i ustoichivosti [Topological optimization of power designs taking into account requirements of rigidity and stability]. *Doklady 3-i Vserossiiskoi konferentsii "Problemy optimal'nogo proektirovaniia sooruzhenii"*. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2014, pp. 56-63.

16. Alekseitsev A.V. Optimal'nyi strukturno-parametricheskii sintez sistem usileniia metallicheskiikh ferm [Optimum structural and parametrical synthesis of systems of strengthening of metal truss]. *Stroitel'naiia mekhanika inzhenernykh konstrukttsii i sooruzhenii*, 2013, no. 2(2), pp. 37-46.

Получено 5.11.2015

Об авторе

Ходяков Вячеслав Андреевич (Минск, Республике Беларусь) – магистрант кафедры «Мосты и тоннели» Белорусского национального технического университета (220114, г. Минск, пр. Независимости, 150, e-mail: x@monogroup.by).

About the author

Viaheslav A. Khodiakov (Minsk, Republic of Belarus) – Master Student, Department of Bridges and Tunnels, Belarusian National Technical University (150, Independence av., Minsk, 125319, Republic of Belarus, e-mail: x@monogroup.by).