

В.А. Ходяков, В.Г. Пастушков

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФЕРМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛИНИЙ ГЛАВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

При попытке создать наиболее эффективную с точки зрения несущей способности конструкцию пролетного строения моста стоит рассмотреть возможность использования в качестве формообразующих структуры линий главных напряжений, выстроенных на поверхностях общей формы конструкции.

В статье описывается способ экспериментального проектирования структур ферм, в основу которого положен принцип расположения стержней ферм по линиям главных напряжений. При помощи программных комплексов Rhinoceros, Grasshopper и Karamba запроектирована ферма с прямоугольным контуром. Структура фермы, образованная внутри этого контура, повторяет линии главных напряжений. Выделены две группы элементов, работающих на сжатие и растяжение. При помощи расчетного комплекса SOFiSTiK произведен нелинейный расчет конструкции фермы. Получены результаты расчета, проанализированы полученные усилия, сделаны выводы о принципах работы конструкции. По тому же принципу запроектировано пролетное строение в виде пространственной фермы, форма которой повторяет своими очертаниями оболочку вытянутого тела. Вытянутое тело имеет постоянное поперечное сечение в виде эллипса.

В обеих конструкциях сделана попытка заменить группу жестких растянутых элементов на стальные канаты. Рассчитаны варианты с установкой непереднапряженных и преднапряженных канатов. Проанализированы полученные результаты нелинейного расчета, сделаны выводы о характере работы конструкций. По результатам проектирования описаны преимущества и особенности структуры полученных ферм. Кратко проанализированы тенденции технического развития методов строительства. Сделаны выводы по возможностям реального применения подобного рода сложных конструкций в реальном строительстве.

Ключевые слова: линии главных напряжений, ферма, пролетное строение, мост, оболочка, оптимизация, архитектура, вычислительное проектирование, SOFiSTiK, Grasshopper, Rhinoceros, Karamba.

V.A. Khodiakov, V.G. Pastushkov

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic Belarus

DESIGN OF TRUSSES WITH USING LINES OF PRINCIPAL STRESS

In an effort to create a bridge span structure, in terms of the most effective load-bearing capacity, is worth to consider principal stresses lines using, which built on the general structure form surfaces.

This article describes the designing of experimental truss, which formed by arrangement of rods along the principal stresses lines. The computer software Rhinoceros, Grasshopper and Karamba allows designing trusses in rectangular contour with using of this principle. The rods inside the contour repeat the principal stresses lines.

Revealed two groups of elements: compressive and tensile rods. The SOFiSTiK calculation complex promoted to make non-linear calculation of truss. The obtained results of calculation were analyzed.

By the same principle was construct span like space truss. The form of this truss repeats the oblate cylindrical shape.

In both constructions attempted to change a group of hard tensile rods to cables. Calculation was made with prestressed and not prestressed cables options. The results of non-linear calculation were analyzed and were make conclusions about structure's work character.

Based on the results of design were described the advantages and features of the structure obtained farms. Ware briefly analyzed trends of technological development of building methods. Ware made conclusions about the possibility of a real application of these kind complicated constructions in real life.

Keywords: principal stress lines, truss, span, bridge, shell, optimization, architecture, computational design, SOFiSTiK, Grasshopper, Rhinoceros, Karamba.

Одной из наиболее важных проблем эффективного проектирования является наиболее правильное распределение материала по конструкции пролетного строения [1]. Это позволяет существенно снизить материалозатраты на производство конструкций [2, 3]. Кроме того, нелинейное распределение материала по конструкции добавляет ей архитектурной привлекательности [4, 5], делая несущие элементы более ценными с эстетической точки зрения [6, 7]. Работу в том же направлении ведут европейские архитекторы Роберт Стюарт Смитт¹ [8] и Даниель Пайкер [9]. В России также имеются архитектурные разработки, которые в рамках вычислительного проектирования пытаются завязать такие понятия, как архитектура и несущая способность конструкции² [10, 11]. В Беларуси последние пять лет в рамках междисциплинарного сообщества Monogroup ведется разработка этого направления с точки зрения инженерно-конструкторской деятельности [12].

Главным принципом при создании несущего каркаса фермы стало расположение стержневых элементов конструкции по сетке линий главных напряжений формообразующих поверхностей (рис. 1).

Проектирование такой фермы велось с использованием программных комплексов SOFiSTiK [13], Rhinoceros [14], Grasshopper [15] и Karamba [16]. Karamba и SOFiSTiK использовались для расчета конструкции методом конечных элементов и построения линий главных напряжений. Rhinoceros и Grasshopper являлись инструментами для создания расчетной схемы несущей конструкции.

¹ Смитт Р.С. Лекция о формообразовании [Электронный ресурс]. URL: <http://www.youtube.com/watch?v=LLzuVv4cB8>.

² Аршавская Н. Вдохновленные Шуховым. Документальный фильм [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=onxy8rGOVdo>.

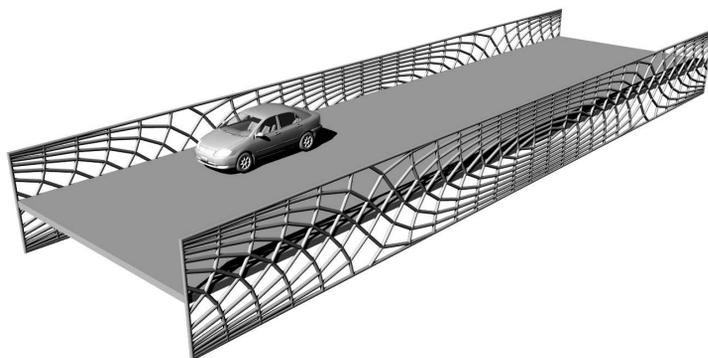


Рис. 1. Общий вид пролетного строения с фермами, структура которых выстроена по сетке линий главных напряжений

Изначально был проведен расчет прямоугольного вертикального листа стали, который принят в качестве формообразующей. Этот лист своими границами повторял контур будущей фермы. Для получения линий главных напряжений по центру листа была приложена условная нагрузка в уровне проезжей части (рис. 2). Длина проектируемого расчетного пролета составила 30 м. Высота фермы была принята равной 3 м. По концам конструкция была жестко закреплена, имитируя элемент неразрезного пролетного строения.

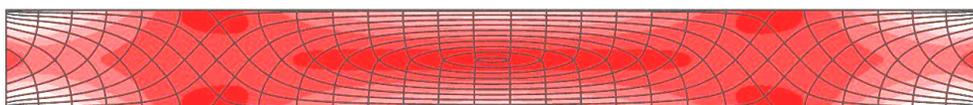


Рис. 2. Фасад стального листа с изополями напряжений и выстроенными линиями главных напряжений

Линии главных напряжений были проведены через характерные точки, находящиеся в уровне проезжей части с шагом 1 м по ее длине. Это предполагало равномерную передачу нагрузки от плиты проезжей части на ферму.

После того как была получена сетка линий главных напряжений, она была обработана и упрощена. Участки между точками пересечения линий были спрямлены.

Далее полученная структура линий была превращена в расчетную схему из стержневых элементов и передана в расчетный комплекс SOFiSTiK для нелинейного анализа. Для расчета вдоль фермы по ее центру (в уровне проезжей части) была приложена распределенная нагрузка в 100 кН/м. В результате расчета был получен ожидаемый ре-

зультат (рис. 3). Стержневые элементы, выстроенные по линиям главных сжимающих напряжений, работают исключительно на сжатие (эпюра красного цвета), а выстроенные по линиям главных растягивающих напряжений – на растяжение (эпюра синего цвета).

Имеются единичные отклонения от характера работы в группах стержней. Это можно обосновать спрямлением линий главных напряжений для создания прямых стержней фермы, а также наличием искусственно созданного прямоугольного контура фермы.

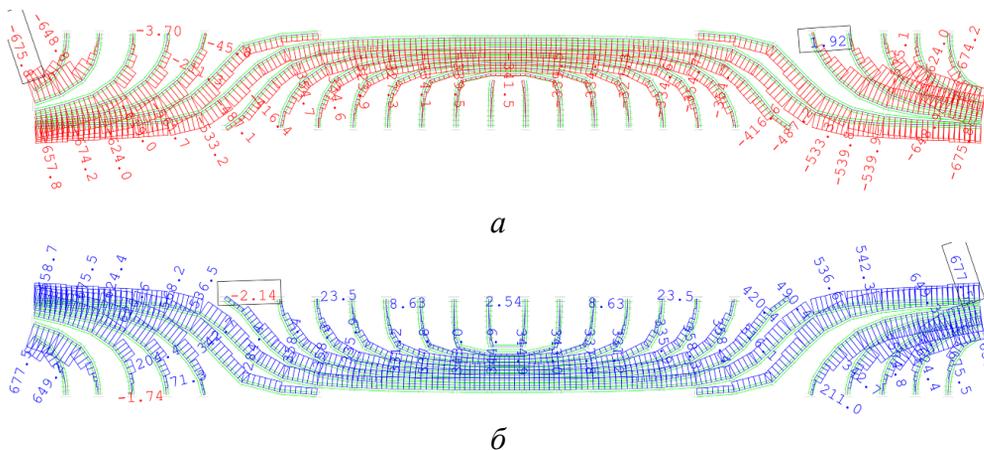


Рис. 3. Эпюры нормальных усилий в стержнях жесткой фермы: *а* – по первой группе элементов, работающих на сжатие; *б* – по второй группе элементов, работающих на растяжение

При расчетной длине пролета 30 м, погонной нагрузке 100 кН/м и стержнях из трубок диаметром 101,6 мм и толщиной стенки 10 мм из стали 10ХСНД несущая способность конструкции по результатам расчета была обеспечена. Максимальный прогиб конструкции составил 43,6 мм.

Следующим шагом стала попытка заменить все жесткие работающие на растяжение элементы на стальные канаты диаметром 50 мм. При этом элементы, работающие на сжатие, были оставлены жесткими. В результате была получена новая расчетная схема (рис. 4).

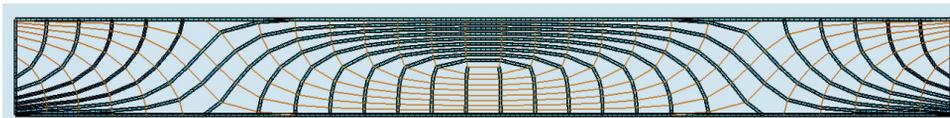


Рис. 4. Общий вид расчетной схемы плоской фермы. Элементы, работающие на растяжение, заменены канатами (желтые линии)

После расчета конструкции были получены эпюры, представленные на рис. 5. В результате замены элементов система полностью сохранила принципы работы, однако произошла потеря жесткости, прогиб конструкции составил 67,2 мм. Имел место и аномально высокий прогиб самого верхнего стержня, но это является следствием наличия искусственного прямоугольного контура конструкции. Несущая способность была сохранена, однако усилия в жестких элементах возросли.

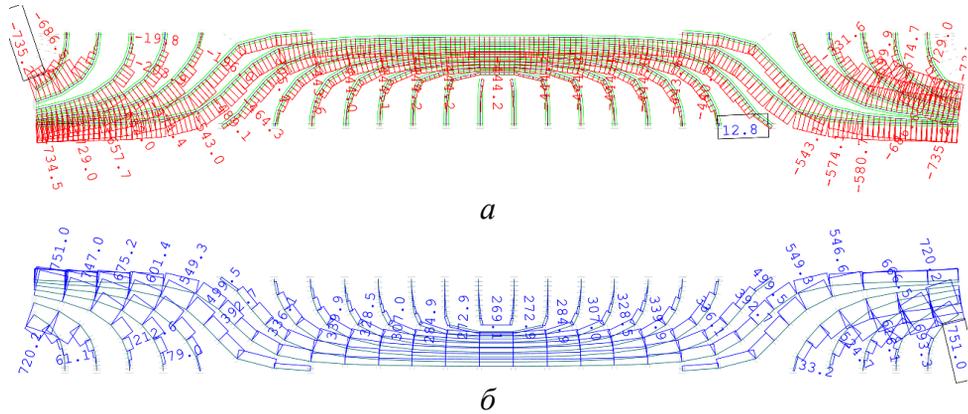


Рис. 5. Эпюры нормальных усилий фермы с канатами: *a* – по первой группе жестких элементов, работающих на сжатие; *б* – по второй группе канатных элементов, работающих на растяжение

При создании в канатах преднапряжения в 200 кН произошло восстановление жесткости, прогиб уменьшился до 42,1 мм. Напряжения в жестких элементах значительно снизились – на 15–20 % (рис. 6).

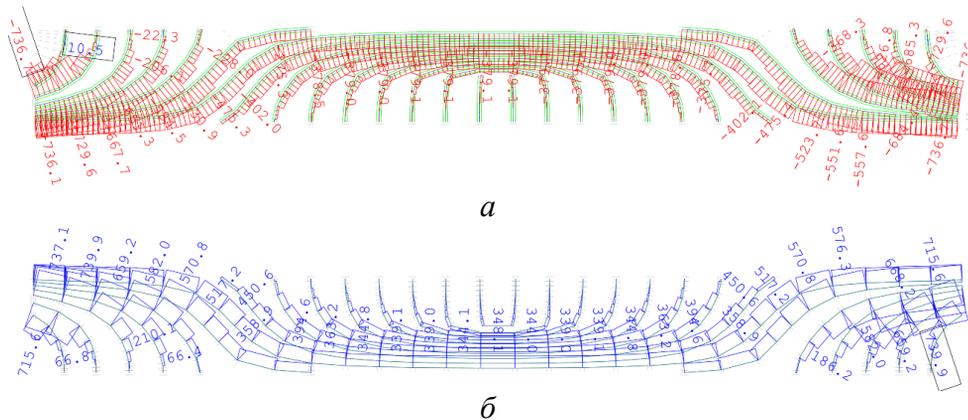


Рис. 6. Эпюры нормальных усилий фермы с канатами. Преднапряжение канатов 200 кН: *a* – по первой группе жестких элементов, работающих на сжатие; *б* – по второй группе канатных элементов, работающих на растяжение

В жестких элементах, как в первом, так и во втором случае, все же имели место изгибающие моменты. Однако их значения составили не более 15 кН·м. Наличие изгибающих моментов можно объяснить тем, что в структуре фермы линии главных напряжений были преобразованы в ломаные линии. При увеличении плотности сетки линий главных напряжений моменты уменьшаются.

Следующим шагом стало проектирование пространственной фермы, которая повторяла своими очертаниями оболочку в форме вытянутого тела с постоянным поперечным сечением в форме эллипса (рис. 7).

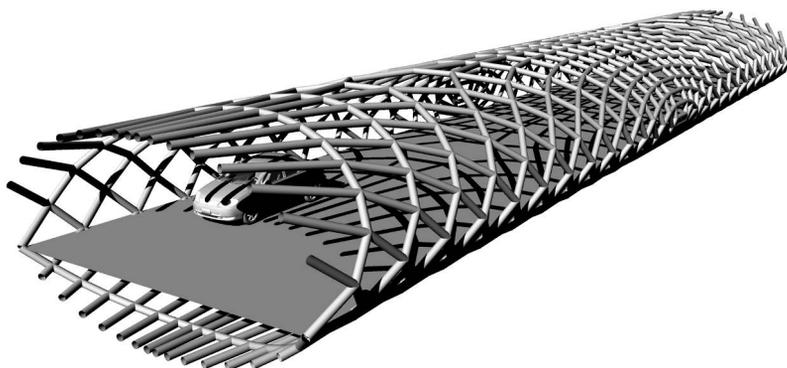


Рис. 7. Решетка пространственной фермы, элементы которой построены по линиям главных напряжений

Здесь также применялось жесткое закрепление конструкции по концам. Линии главных напряжений выстраивались по тому же принципу, что и в плоской ферме. Сначала был произведен расчет металлической оболочки с условными нагрузками. Затем по результатам расчета по поверхности оболочки были выстроены линии главных напряжений, вдоль которых были расположены стержни фермы (рис. 8).

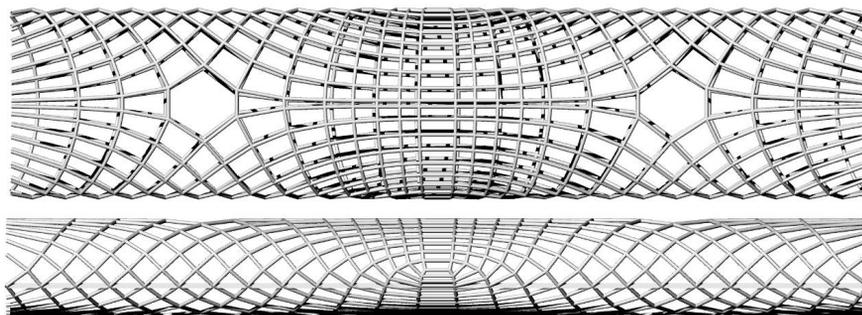


Рис. 8. План и фасад решетки полученной пространственной фермы

Важным отличием стало то, что здесь отсутствует контур конструкции, как это было в плоской ферме. В данном случае оболочка замкнута и абсолютно все элементы являются выстроенными по линиям главных напряжений.

Расчет конструкции был произведен для фермы с расчетным пролетом 50 м. Высота конструкции 5,5 м, ширина 11 м. Уровень проезжей части здесь расположен на 1 м ниже центральной оси конструкции. Две распределенные нагрузки величиной по 100 кН/м были приложены по двум боковым сторонам пролета в уровне проезжей части. Сечение стержней фермы представляло собой трубки диаметром 139,7 мм и толщиной стенки 20 мм. Стержни изготовлены из стали 10ХСНД.

По результатам расчета в SOFiStiK, несущая способность конструкции была сохранена. Максимальный прогиб фермы составил 59 мм. Интересным фактом стало то, что на расстоянии 1/4 длины пролета от точки опирания прогибы нижних стержней имели отрицательное значение (рис. 9).

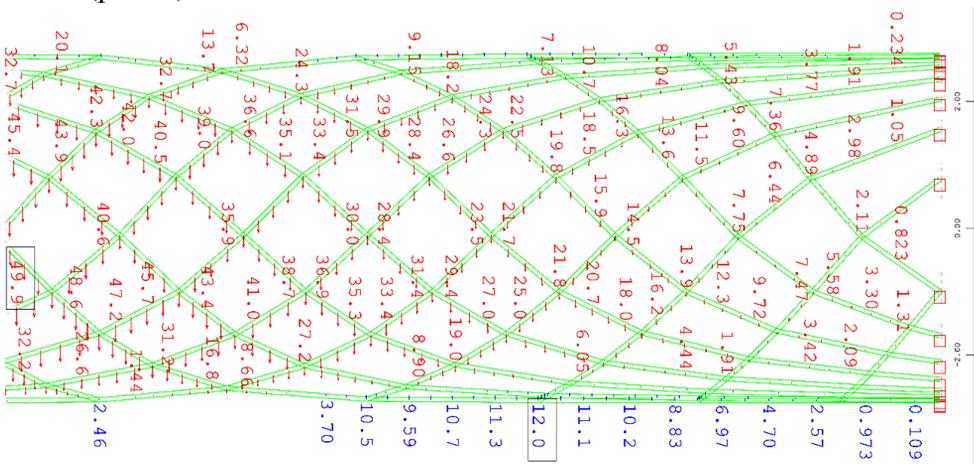
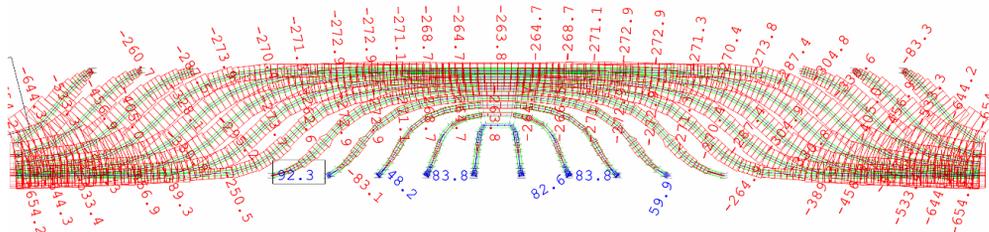
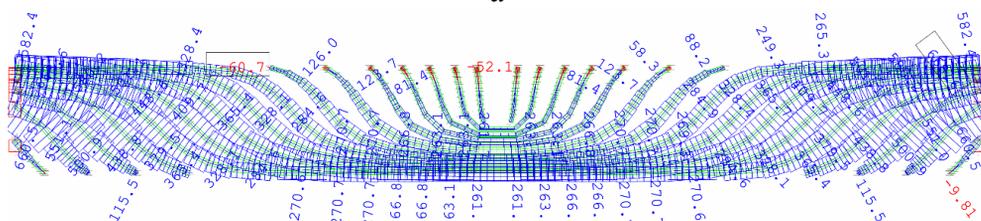


Рис. 9. Прогибы стержней конструкции. Синим цветом показаны отрицательные прогибы, красным – положительные

Были получены эпюры нормальных усилий (рис. 10, 11). Можно заметить, что выделенные группы элементов в целом сохраняют предполагаемый принцип работы. Однако в нижней и верхней частях пролета имеются серьезные отклонения.

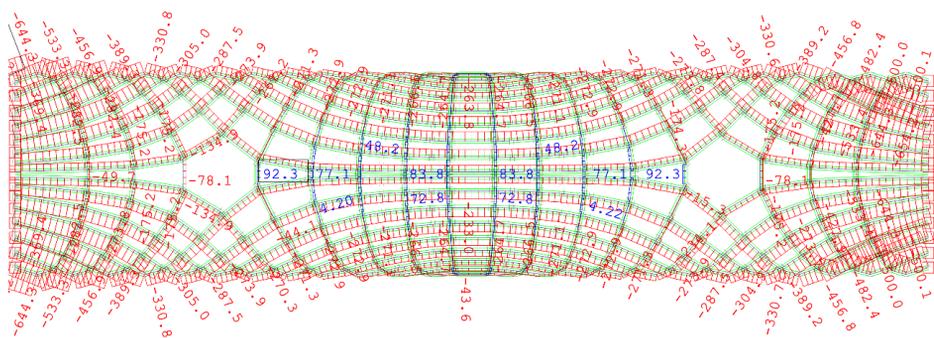


a

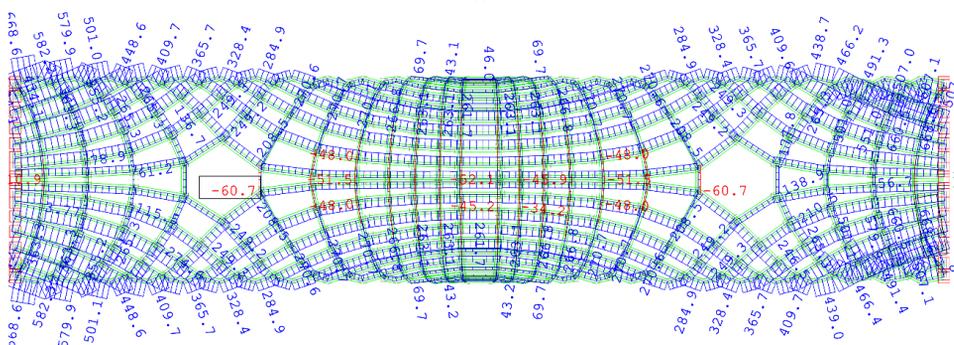


б

Рис. 10. Эпюры нормальных усилий в стержнях пространственной фермы (вид сбоку): *a* – по первой группе элементов, работающих на сжатие; *б* – по второй группе элементов, работающих на растяжение



a



б

Рис. 11. Эпюры нормальных усилий в стержнях пространственной фермы (вид сверху): *a* – по первой группе элементов, работающих на сжатие; *б* – по второй группе элементов, работающих на растяжение

Поскольку применение в конструкции прямых стержней вынуждает отклоняться от плавных кривых линий главных напряжений, имеют место изгибающие моменты в элементах, однако, как и в случае с плоской фермой, они не велики и не превышают 20 кН·м.

При замене группы растянутых элементов на канаты диаметром 50 мм потребовалось увеличить сечения жестких элементов до трубок диаметром 244,5 мм и толщиной стенки 20 мм (рис. 12). В противном случае несущая способность конструкции по первой группе предельных состояний не обеспечивалась. При нелинейном анализе, производимом модулем ASE, совершено более трех тысяч итераций, но так и не найдено решение этой задачи. При этом в процессе расчета наблюдались огромные скачки остаточных усилий (рис. 13), что говорит о сложности и неустойчивости системы.

Для расчета конструкции пришлось прибегнуть к использованию более узкоспециализированного модуля STAR2, который предназначен только для решения стержневых расчетных схем.

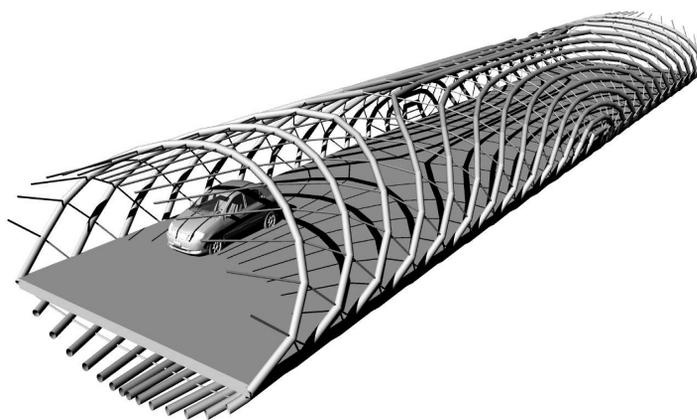


Рис. 12. Общий вид конструкции. Группа растянутых элементов заменена 50-миллиметровыми канатами

В результате расчета обнаружилось, что верхние стержни ближе к центру пролета получили очень большие перемещения «внутрь» конструкции (рис. 14). Прогиб конструкции составил 265,7 мм, однако самые верхние стержни имели прогиб до 722,7 мм. Изгибающие моменты в стержнях не превысили 30 кНм. Были получены следующие эпюры нормальных усилий в канатах и жестких стержнях, представленные на рис. 15, 16.

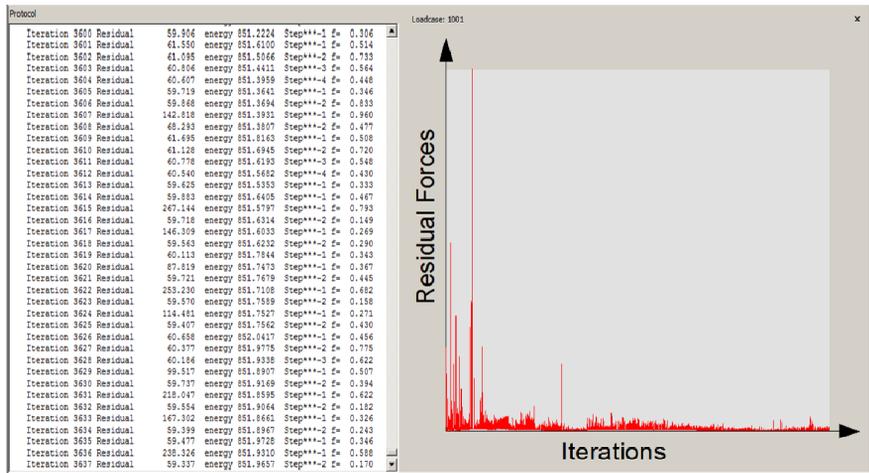


Рис. 13. Протокол и график нелинейного итерационного расчета модулем ASE

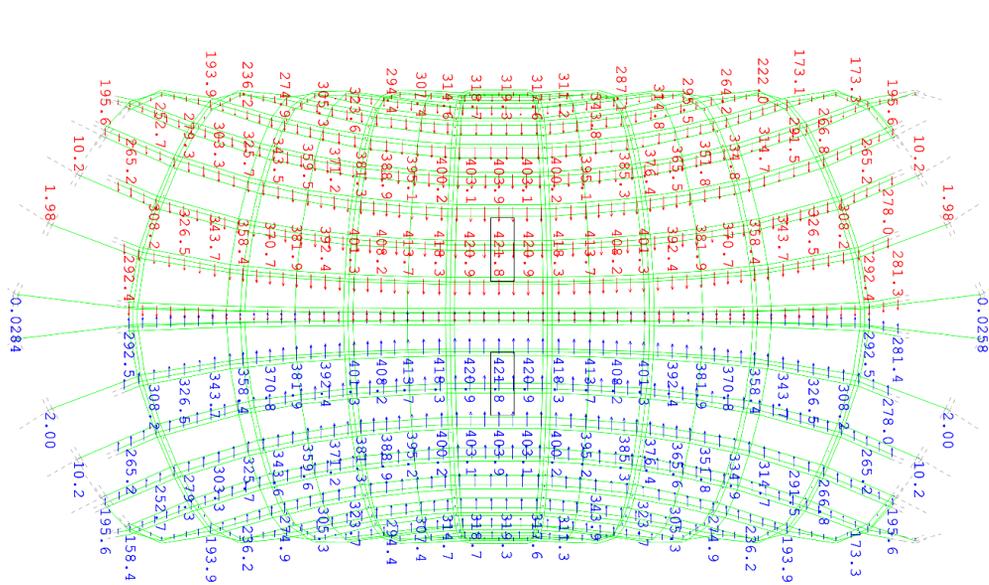
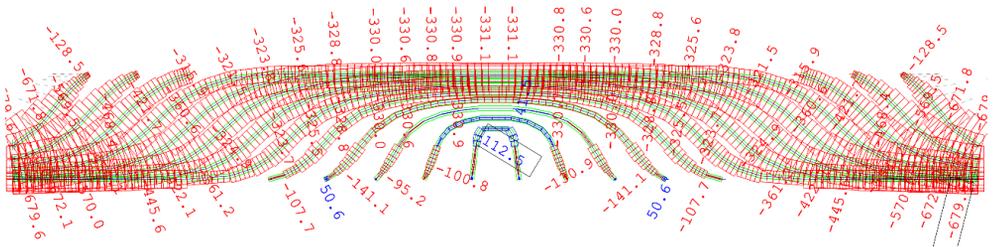
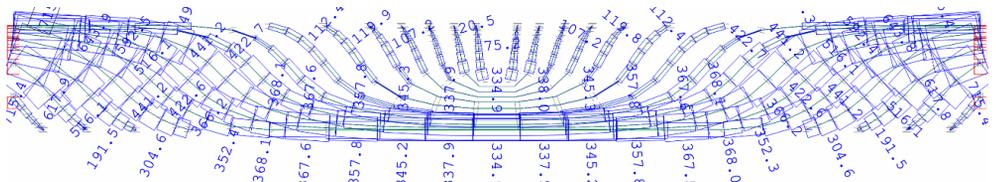


Рис. 14. План центра пролета. Перемещения поперек пролета

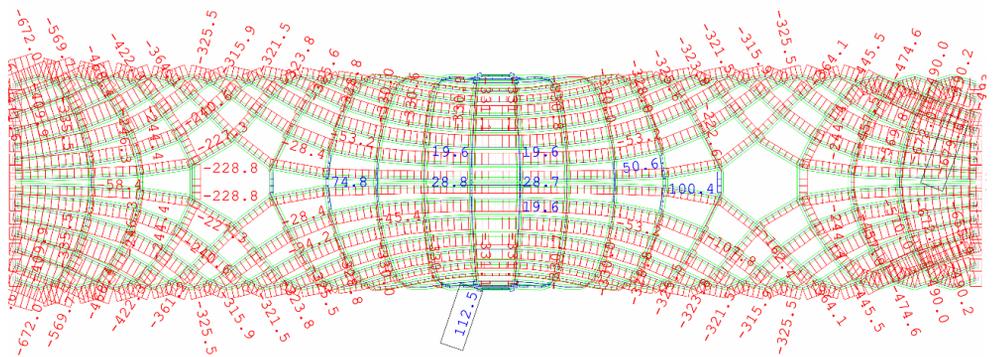


a

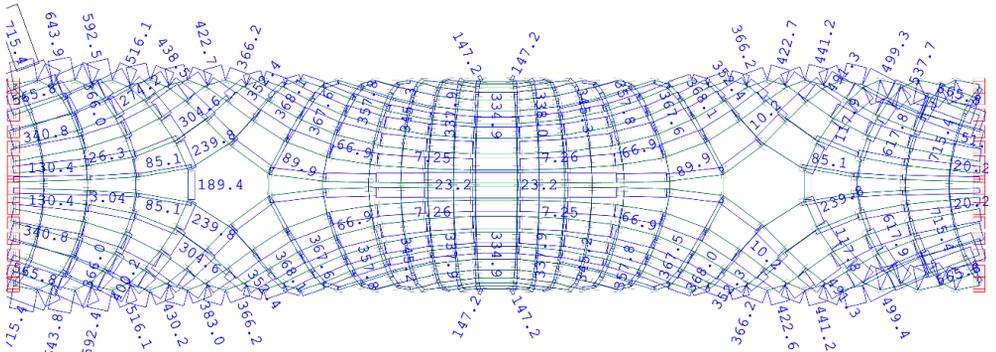


б

Рис. 15. Эпюры нормальных усилий в стержнях и канатах пространственной фермы (вид сбоку): *a* – по первой группе жестких элементов, работающих на сжатие; *б* – по второй группе канатных элементов, работающих на растяжение



a



б

Рис. 16. Эпюры нормальных усилий в стержнях и канатах пространственной фермы (вид сверху): *a* – по первой группе жестких элементов, работающих на сжатие; *б* – по второй группе канатных элементов, работающих на растяжение

После придания канатам преднапряжения в 200 кН несущая способность конструкции по второй группе предельных состояний сохранилась. Прогиб в центре пролета уменьшился до 225 мм. Усилия в жестких стержнях существенно не изменились. Однако появились серьезные изгибающие моменты в стержнях – до 200 кН·м.

При придании канатам преднапряжения в 500 кН несущая способность конструкции по второй группе предельных состояний также сохранилась. Прогиб в центре пролета уменьшился до 163,2 мм. Усилия в жестких стержнях также существенно не изменились. Изгибающие моменты в стержнях остались практически без изменений и, так же как и в случае с преднапряжением в 200 кН, составили порядка 200 кН·м.

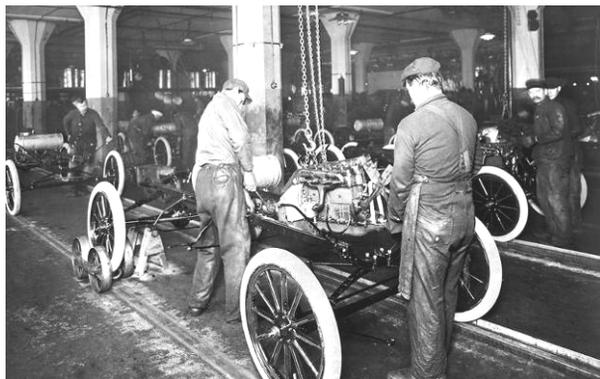
Построение классической фермы подразумевает треугольную структуру как наиболее устойчивую. Однако в данном случае мы получили уникальные по своей природе фермы с ячейками из четырехугольников, которые благодаря своему расположению образуют не менее стабильную структуру практически с полным отсутствием изгибающих моментов. Это достигается тем, что все стержни фермы ориентированы так, чтобы работать только на осевое растяжение или сжатие.

Полученная структура фермы отличается высоким конструктивным смыслом, оригинальностью исполнения и обладает большой архитектурной ценностью по сравнению с классической фермой, в основе которой лежит триангуляция.

Что касается сложности изготовления таких конструкций, то тут стоит отметить, что современные способы производства позволяют при помощи робототехники создавать конструкции любой сложности [17]. При полном переходе на такие способы производства стоимость конечного продукта практически не будет зависеть от его сложности. Это основывается на том, что в отличие от современных поточных производств для машины (робота) не имеет значения, какой сложности производить продукт. Здесь важно только время производства, которое напрямую зависит от количества примененного в конструкции материала.

Ярким примером является то, как сейчас выглядит завод по производству автомобилей Ford, и то, как он выглядел век назад (рис. 17). Единственное отличие конвейера по производству автомобилей тогда и сейчас – это то, что человек был заменен роботом. Однако узкая специализация одной рабочей единицы сохранилась. Несмотря на это, в

действительности для производства изделия не требуется конвейер из роботов. Достаточно одного робота, который будет выполнять все операции, независимо от их типа и сложности. В пользу мультиспециализированных роботов говорит также и то, что сложно себе представить конвейерное возведение строительного объекта.



а



б

Рис. 17. Линии производства автомобилей Ford:
а – 1913 г.; *б* – 2012 г.

В случае с роботом отсутствуют такие критерии, как опыт работы и сложность ее выполнения. Из этого следует, что сегодня появляется возможность постепенно отказаться от такого критерия конструкции, как индустриальность, в пользу ее уникальности и применимости в конкретных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Siegel C. Strukturformen. Der Modernen Architektur. – Munchen: Verlag Georg D.W. Callwey, 1960. – 267 с.

2. Ходяков В.А. Про вычислительное проектирование. По итогам третьего квартала 2013 года [Электронный ресурс] // Итоги научно-исследовательской деятельности внутри междисциплинарного коллектива Monogroup. – 2014. – URL: <http://monogroup.by/archives/11740>.

3. Ходяков В.А. Про вычислительное проектирование. По итогам четвертого квартала 2014 года [Электронный ресурс] // Итоги научно-исследовательской деятельности внутри междисциплинарного коллектива Monogroup. – 2015. – URL: <http://monogroup.by/archives/11808>.

4. Лапшина В.В., Петропавловская И.А. Избранные труды. Строительная механика / под ред. А.Ю. Ишлинского. – М.: Наука, 1977. – 192 с.

5. Архитектурная бионика / Ю.С. Лебедев, В.И. Рабинович [и др.]; под ред. Ю.С. Лебедева. – М.: Стройиздат, 1990. – 269 с.

6. Dunn N. Digital Fabrication in Architecture. – Laurence King Publishing, 2012. – 191 с.

7. Jabi W. Parametric Design for Architecture. – Laurence King Publishing, 2013. – 208 с.

8. Официальный сайт архитектурной мастерской Kokkugia. – URL: <http://www.kokkugia.com>.

9. Пайкер Д. Лекция о формообразовании [Электронный ресурс]. – URL: <http://branchpoint.ru/2011/11/11/lekcija-danielya-pajkera-ob-arxitekture-osnovannoj-na-fizicheskix-zakonax>.

10. Барчугов Е.В. Параметризм как направление современной проектной деятельности // Архитектура и современные информационные технологии. – 2013. – № 25/13-04. – URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2013/4kvart13/index.php>.

11. Хайман Э.В. Новая морфология архитектуры. Зачем гены зданиям? [Электронный ресурс] // Образовательный и исследовательский проект параметрической архитектуры «Точка ветвления». – 2012. – URL: <http://www.liveinternet.ru/users/alex-boo/post244601238>.

12. Официальный сайт белорусского междисциплинарного сообщества Monogroup. – URL: <http://monogroup.by>.

13. SOFiSTiK. Расчёт конструкций // Официальный сайт расчетного комплекса SOFiSTiK. – URL: <http://www.sofistik.com/en>.

14. Rhinoceros. Трёхмерное моделирование // Официальный сайт 3D-редактора Rhinoceros. – URL: <http://www.rhino3d.com>.

15. Grasshopper. Параметрическое моделирование для 3D-редактора Rhinoceros // Официальный сайт плагина Grasshopper. – URL: <http://www.grasshopper3d.com>.

16. Karamba. Параметрическое инженерное проектирование конструкций // Официальный сайт плагина Karamba. – URL: <http://www.karamba3d.com>.

17. Новиков П. Архитектурные роботы. Строительная площадка будущего [Электронный ресурс] // Исследование применения робототехники и цифрового производства в архитектуре и строительстве. – 2013. – URL: <http://theoryandpractice.ru/videos/564-arkhitekturnye-roboty-ctroitelnaya-ploshchadka-budushchego>.

References

1. Siegel C. Strukturformen. Der Modernen Architektur. Munchen: Verlag Georg D.W. Callwey, 1960. 267 p.

2. Khodiakov V.A. Pro vychislitel'noe proektirovanie. Po itogam tret'ego kvartala 2013 goda [About computational design. According to the results of the third quarter of 2013]. *Itogi nauchno-issledovatel'skoi deiatel'nosti vnutri mezhdistsiplinar-nogo kollektiva Monogroup*, 2014, available at: <http://monogroup.by/archives/11740> (accessed 01 February 2015).

3. Khodiakov V.A. Pro vychislitel'noe proektirovanie. Po itogam tret'ego kvartala 2014 goda [About computational design. According to the results of the fourth quarter of 2014]. *Itogi nauchno-issledovatel'skoi deiatel'nosti vnutri mezhdistsiplinar-nogo kollektiva Monogroup*, 2015, available at: <http://monogroup.by/archives/11808> (accessed 01 February 2015).

4. Lapshina V.V., Petropavlovskaya I.A. Izbrannye trudy. Stroitel'naya mekhanika [Selected works. Structural mechanics]. Moscow: Nauka, 1977. 192 p.

5. Lebedev J.C., Rabinovich V.I. [et al.]. Arhitekturnaya bionika [Architectural bionics]. Moscow: Stroiizdat, 1990. 269 p.

6. Dunn N. Digital Fabrication in Architecture. Laurence King Publishing, 2012. 191 p.

7. Jabi W. Parametric Design for Architecture. Laurence King Publishing, 2013. 208 p.

8. Offitsial'nyi sait arkhitekturnoi masterskoi Kokkugia [The official website of the Kokkugia architectural studio], available at: <http://www.kokkugia.com/> (accessed 01 February 2015).

9. Paiker D. Lektsiia o formoobrazovanii [Lecture about shaping], available at: <http://branchpoint.ru/2011/11/11/lekciya-danielya-pajkera-ob-arkhitekture-osnovanno-j-na-fizicheskix-zakonax/> (accessed 01 February 2015).

10. Barchugov E.V. Parametrizm kak napravlenie sovremennoi proektnoi deiatel'no-sti [Parametricism as direction of modern design activity]. *Arkhitektura i sovremennye informatsionnye tekhnologii*, 2013, no. 25/13-04, available at: <http://www.marhi.ru/AMIT/2013/4kvart13/index.php> (accessed 01 February 2015).

11. Khaiman E.V. Novaia morfologija arkhitektury. Zachem geny zdaniiam? [New morphology of architecture. Why genes buildings?]. *Obrazova-tel'nyi i issledovatel'skii proekt parametriceskoi arkhitektury "Tochka vetvleniia"*, 2012, available at: <http://www.liveinternet.ru/users/alex-bool/post244601238> (accessed 01 February 2015).

12. Offitsial'nyi sait belarusskogo mezhdisciplinarnogo soobshchestva Monogroup [The official website of the Belarusian interdisciplinary community Monogroup], available at: <http://monogroup.by> (accessed 01 February 2015).

13. SOFiSTiK. Raschet konstruksii [SOFiSTiK. Calculation of constructions]. *Offitsialnyi sait of the SOFiSTiK calculation complex*, available at: <http://www.sofistik.com/en/> (accessed 01 February 2015).

14. Rhinoceros. Trekhmernoe modelirovanie. [Rhinoceros. 3D-modeling]. *Offitsial'nyi sait 3D-redaktora*, available at: <http://www.rhino3d.com> (accessed 01 February 2015).

15. Grasshopper. Parametriceskoe modelirovanie dlia 3D-redaktore Rhinoceros. [Grasshopper. Parametric modeling for 3D-editor Rhinoceros]. *Offitsialnyi sait plagina Grasshopper*, available at: <http://www.grasshopper3d.com> (accessed 01 February 2015).

16. Karamba. Parametriceskoe inzhenernoe proektirovanie konstruksii. [Karamba. Parametric engineering design]. *Offitsialnyi sait plagina Karamba*, available at: <http://www.karamba3d.com> (accessed 01 February 2015).

17. Novikov P. Arkhitekturnye roboty. Stroitel'naia ploshchadka budushchego [Architectural robots. The construction site of the future]. *Issledovanie primeneniia robototekhniki i tsifrovogo proizvodstva v arkhitekture i stroitel'stve*, 2013, available at: <http://theoryandpractice.ru/videos/564-arkhitekturnye-roboty-ctroitelnaya-ploshchadka-budushchego> (accessed 01 February 2015).

Получено 9.03.2015

Об авторах

Ходяков Вячеслав Андреевич (Минск, Республика Беларусь) – студент Белорусского национального технического университета (220114, г. Минск, пр. Независимости, 150, e-mail: x@monogroup.by).

Пастушков Валерий Геннадьевич (Минск, Республика Беларусь) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мосты и тоннели» Белорусского национального технического университета (220114, г. Минск, пр. Независимости, 150, e-mail: valpast@inbox.ru).

About the authors

Viacheslav A. Khodiakov (Minsk, Republic Belarus) – Student, Belarusian National Technical University (150, Nezavisimost' av., Minsk, 220114, Republic Belarus, e-mail: x@monogroup.by).

Pastushkov Valerii Gennad'evich (Minsk, Republic Belarus) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Bridges and Tunnels Belarusian National Technical University ((150, Nezavisimost' av., Minsk, 220114, Republic Belarus, e-mail: valpast@inbox.ru).