



DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-2-199-209

EDN: CUKIGR


УДК 624.04

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Рациональные конструктивные решения треугольных ферм

В.А. Репин , А.В. Лукина  , А.С. Усов 

Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация

 pismo.33@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 16 января 2023 г.

Доработана: 5 апреля 2023 г.

Принята к публикации: 10 апреля 2023 г.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2020-0015, госзадание ВлГУ).

Для цитирования

Репин В.А., Лукина А.В., Усов А.С. Рациональные конструктивные решения треугольных ферм // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 2. С. 199–209. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-2-199-209>

Аннотация. Деревянные стропильные конструкции обладают несомненными достоинствами, обуславливающими их широкое применение. В качестве объекта исследования выбраны треугольные стропильные конструкции. Цель исследований – установление зависимости значений усилий в элементах обозначенной конструкции от величины ее стрелы подъема. Представлен расчет треугольной фермы с использованием диаграммы Максвелла – Кремоны. Эффективность предлагаемой методики устанавливалась на основе изучения конструкции деревянной фермы типа «ножницы». Обнаружена следующая закономерность: изменение координаты точек (абсцисс) диаграммы усилий обратно пропорционально изменению f . Определена область рациональных значений стрелы подъема (уклона кровли), при которых величины внутренних усилий стремятся к минимуму. Выявлено, что по мере уменьшения уклона кровли значения приращений усилий в элементах фермы на каждом шаге увеличиваются с 27 % в два раза. На основании графического анализа полученных данных найден диапазон эффективных значений уклона кровли, при котором усилия в элементах фермы принимают минимальные значения. Пользуясь графическим методом определения усилий, можно проверять варианты уклона кровли в поиске рационального решения конструкции фермы типа «ножницы». Таким образом, предлагаемый метод способствует выбору наиболее экономичных конструктивных решений.

Ключевые слова: ферма-ножницы, стропильные системы, диаграмма Максвелла – Кремоны, деревянные конструкции

Репин Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-9107-6606; skia2000@mail.ru

Лукина Анастасия Васильевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-6065-678X; pismo.33@yandex.ru

Усов Алексей Сергеевич, магистрант, Институт архитектуры, строительства и энергетики, Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-6160-9889; usovlexx@mail.ru

© Репин В.А., Лукина А.В., Усов А.С., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Rational structural solutions for triangular trusses

Vladimir A. Repin^{ID}, Anastasia V. Lukina^{ID}✉, Alexey S. Usov^{ID}

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation

✉ pismo.33@yandex.ru

Article history

Received: January 16, 2023

Revised: April 5, 2023

Accepted: April 10, 2023

Acknowledgements

The work was carried out within the state task in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2020-0015, state assignment VISU).

For citation

Repin V.A., Lukina A.V., Usov A.S. Rational structural solutions for triangular trusses. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023;19(2):199–209. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-2-199-209>

Abstract. Wooden rafter structures have undoubted advantages, which determine their wide application. The object of the study is triangular rafter structures. The purpose of the research is to find the dependence of force values in the elements of the studied structure on the magnitude of its lifting boom. The calculation of a triangular truss using the Maxwell – Cremona diagram is presented. The efficiency of the proposed method was estimated on the basis of a study of the structure of a wooden truss of the “scissors” type. The following pattern has been established: the change in the coordinates of the points (abscissas) of the force diagram is inversely proportional to the change in f . It is determined the area of rational values of the lift (roof slope) at which the values of internal forces tend to a minimum. It was revealed that the values of force increments in the truss elements at each step increase from 27% to 2 times when the roof slope decreases. Based on the graphical analysis of the obtained data the range of effective values of the roof slope at which the forces in the elements of the truss take minimum values was found. Using a graphic method of determining the forces, it is possible to check variants of the roof slope in the search for a rational solution of the “scissor” type truss structure. It follows that the proposed method contributes to the choice of the most economical structural solutions.

Keywords: scissor farm, rafter systems, Maxwell – Cremona diagram, wooden structures

1. Введение

Деревянные стропильные системы являются эффективными несущими конструкциями. Одно из направлений развития деревянных конструкций – поиск конструктивных решений, повышающих их эксплуатационные качества [1–4]. Основной задачей при этом будет выявление взаимозависимости параметров конструкции и определение их гармоничного сочетания. Обоснование и принятие наиболее целесообразного решения на этапе проектирования позволит сократить расходы на строительство и эксплуатацию всего здания или сооружения. Эффективные конструктивные решения остаются актуальной задачей для строительной отрасли [5–7].

Наиболее часто используют общие критерии проектирования экономичных конструкций, такие как материалоемкость, трудоемкость изготовления, технологичность конструкции. Зачастую невозможно выполнить расчет стропильных систем без моделирования и сложных математических операций [8–12]. На практике же требуется определить тот или иной рациональный параметр конструкции без громоздких вычислений.

Настоящее исследование посвящено изучению треугольных деревянных ферм типа «ножницы». Данную конструкцию отличает простота в сборке и низкая материалоемкость. В настоящий момент такое решение популярно среди ферм, выполненных из деревянного бруса (рис. 1). Конструкция фермы обладает высокоэстетичными формами, что обеспечивает большую свободу в дизайне зданий и сооружений, характеризуется рациональным использованием материалов в сочетании с низким воздействием на окружающую среду [13; 14].

Vladimir A. Repin, PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Structures, Institute of Architecture, Civil Engineering and Energy, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9107-6606; skia2000@mail.ru

Anastasia V. Lukina, PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Structures, Institute of Architecture, Civil Engineering and Energy, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6065-678X; pismo.33@yandex.ru

Alexey S. Usov, master's student, Institute of Architecture, Civil Engineering and Energy, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6160-9889; usovlex@mail.ru

Цель исследования – установить зависимость значений усилий в элементах рассматриваемой конструкции от величины ее стрелы подъема. Достижение поставленной цели предполагалось осуществить с помощью диаграммы усилий Максвелла – Кремоны (далее М–К), поскольку она представляет собой единую систему, наглядным образом отражающую взаимосвязь усилий в элементах ферм [15].

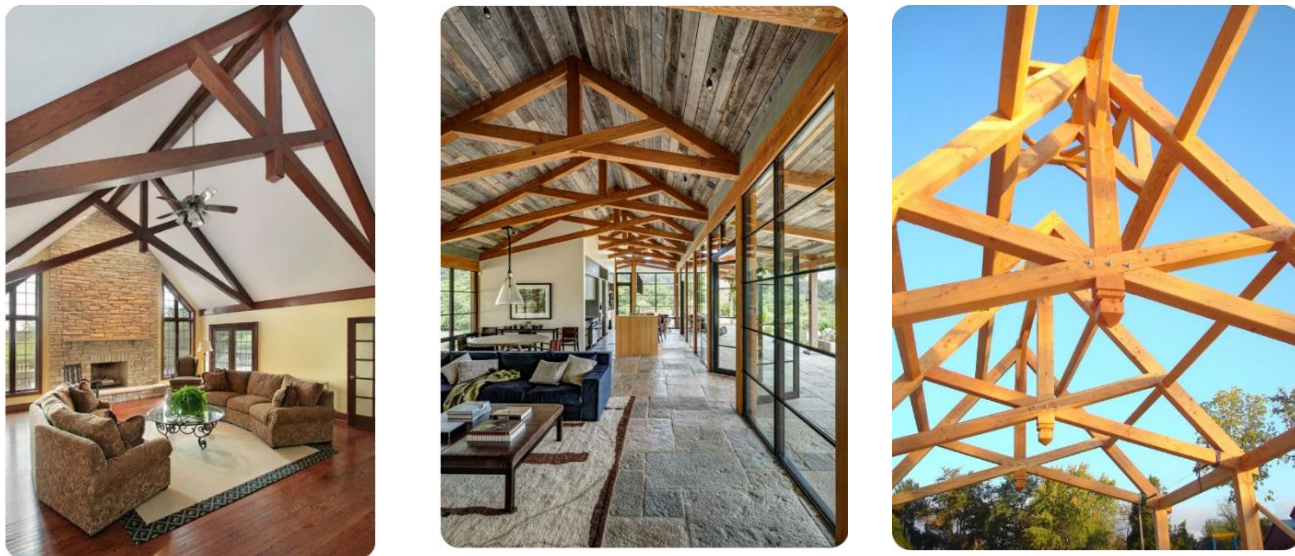


Рис. 1. Применение ферм типа «ножницы»
(Источник: <https://ru.pinterest.com/pin/> (дата обращения: 15.12.2022))
Figure 1. The use of trusses of the “scissor” type
(Source: <https://ru.pinterest.com/pin/> (accessed: 15.12.2022))

2. Методы

Диаграмма М–К является простым графическим приемом, которым удобно пользоваться, когда стоит задача поиска рационального решения: уклона кровли к пролету конструкции [16–20].

Приняты некоторые предпосылки:

- нагрузки прикладываются в узлы верхнего пояса конструкции в виде сосредоточенных сил;
- внешние нагрузки действуют только вертикально (учет горизонтальных составляющих нагрузок предполагается учитывать в дальнейших исследованиях);
- взаимное примыкание элементов выполнено шарнирным, таким образом исключается возникновение изгибающих моментов.

Рассмотрим ферму треугольного очертания (рис. 2).

В таких конструкциях могут варьироваться следующие параметры: стрела подъема f , одновременно с этим изменяется уклон кровли; положение узлов примыкания ветвей нижнего пояса к элементам верхнего пояса (расстояния a и b).

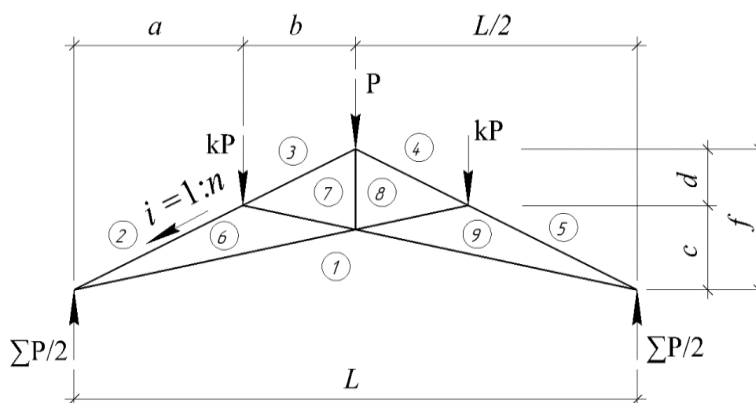


Рис. 2. Расчетная схема конструкции в параметрическом виде
Figure 2. Calculation scheme of the structure in the parametric form

Опыт проектирования распорных конструкций показывает, что по мере уменьшения стрелы подъема f усилия в элементах фермы будут увеличиваться. Что же касается положения элементов нижнего пояса, возникает задача определения уклонов кровли (или стрелы подъема), при которых сечения элементов фермы будут рациональными. В качестве критерия эффективности принимаем величину усилий в элементах конструкции. В итоге это напрямую влияет на ее материалоемкость. Попытаемся установить зависимость величин усилий от стрелы подъема.

Рассмотрим деревянную треугольную ферму пролетом L 12 метров и проанализируем конструктивные решения с различными уклонами элементов верхнего пояса $i = 2f/L$: 1/4; 1/3; 1/2; 1/2,5; 1/1.

Общий алгоритм поиска эффективного решения включает следующие этапы:

- построение диаграммы усилий М–К для различных значений фактора $i = 2f/L$;
- определение значений усилий по диаграмме;
- выявление характера зависимости усилий от фактора i ;
- анализ результатов исследований.

Предложенный алгоритм исследования реализован в среде табличного процессора MS Excel.

3. Результаты и обсуждение

Нагрузки для всех вариантов конструктивных решений выполнены эталонной нагрузкой: наименьшее значение одной из сосредоточенных сил принято равным единице, другие же значения получены с учетом разницы грузовых площадей покрытия, приходящихся на соответствующие узлы верхнего пояса фермы (рис. 3).

С помощью диаграммы определяется значение усилий в решетчатой конструкции. На рис. 3 номерами обозначены зоны (с 1 по 8) для построения диаграммы. Длины отрезков соответствуют значениям усилий в элементах фермы. Например, в элементе между зонами 2 и 6 (далее № 2–6) возникает усилие, равное длине отрезка на диаграмме между точками с такими номерами. Кроме того, диаграмма позволяет определить знаки усилий: растяжение или сжатие.

При построении диаграмм отмечена закономерность: изменение координаты точек (абсцисс) диаграммы обратно пропорционально изменению стрелы подъема f . Фигура диаграммы изменяет только свою длину. Высота диаграммы зависит от величины нагрузки, то есть значения P .

Таким образом, в случае возникновения необходимости пересчета вариантов конструкций для различных значений стрелы подъема f появляется возможность избежать процессов корректировки и экспертизы конечноэлементной модели (КЭМ). При этом достаточно отмасштабировать диаграмму М–К с учетом соотношения величин стрелы подъема f исходной и конечной схем фермы, а затем снимать значения усилий с готовой диаграммы.

Зависимость усилий в элементах фермы от изменения уклона верхнего пояса конструкции (далее – уклона кровли) носит нелинейный характер. Это и является предметом исследования.

Для обеспечения объективности оценки данной зависимости рассмотрим варианты конструктивных решений фермы с постоянным шагом изменения уклона кровли: от 20 до 100 % с шагом 10 %. То есть при $i = 2f/L = 1/5; 1/3,33; 1/2,5; 1/2; 1/1,67; 1/1,43; 1/1,25; 1/1,11; 1/1$ (или при $i = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$).

Значения усилий в элементах исследуемой конструкции, установленных по диаграмме М–К, представлены в табл. 1.

На основании данных табл. 1 построим диаграмму (рис. 4), предварительно сгруппировав одинаковые значения данных, и проведем ее анализ. Диаграмма на рис. 4 отражает значения продольных усилий N в элементах фермы в зависимости от уклона кровли. Величины отношения значений усилий к их минимальному значению (в данном случае при уклоне кровли 1:1) приведены в табл. 2.

Диаграмма на рис. 5 отражает значения усилий в элементах фермы в зависимости от уклона кровли. Анализируя диаграмму на рис. 5, можно наблюдать закономерность значений приращений усилий, которые приведены в табл. 2.

Данные табл. 3 показывают, что по мере понижения уклона кровли значения приращений на каждом шаге увеличиваются с 27 % в два раза. Однако этих данных недостаточно. Для достижения объективности анализа полученных данных необходимо установить функциональную зависимость выходных данных от значений варьируемого параметра. В данном случае это зависимость изменения значений внутренних усилий в элементах фермы от соотношения стрелы подъема к пролету исследуемой конструкции, которое выражается с помощью величины уклона кровли: $i = 2f/L$, то есть отношением стрелы подъема к половине пролета.

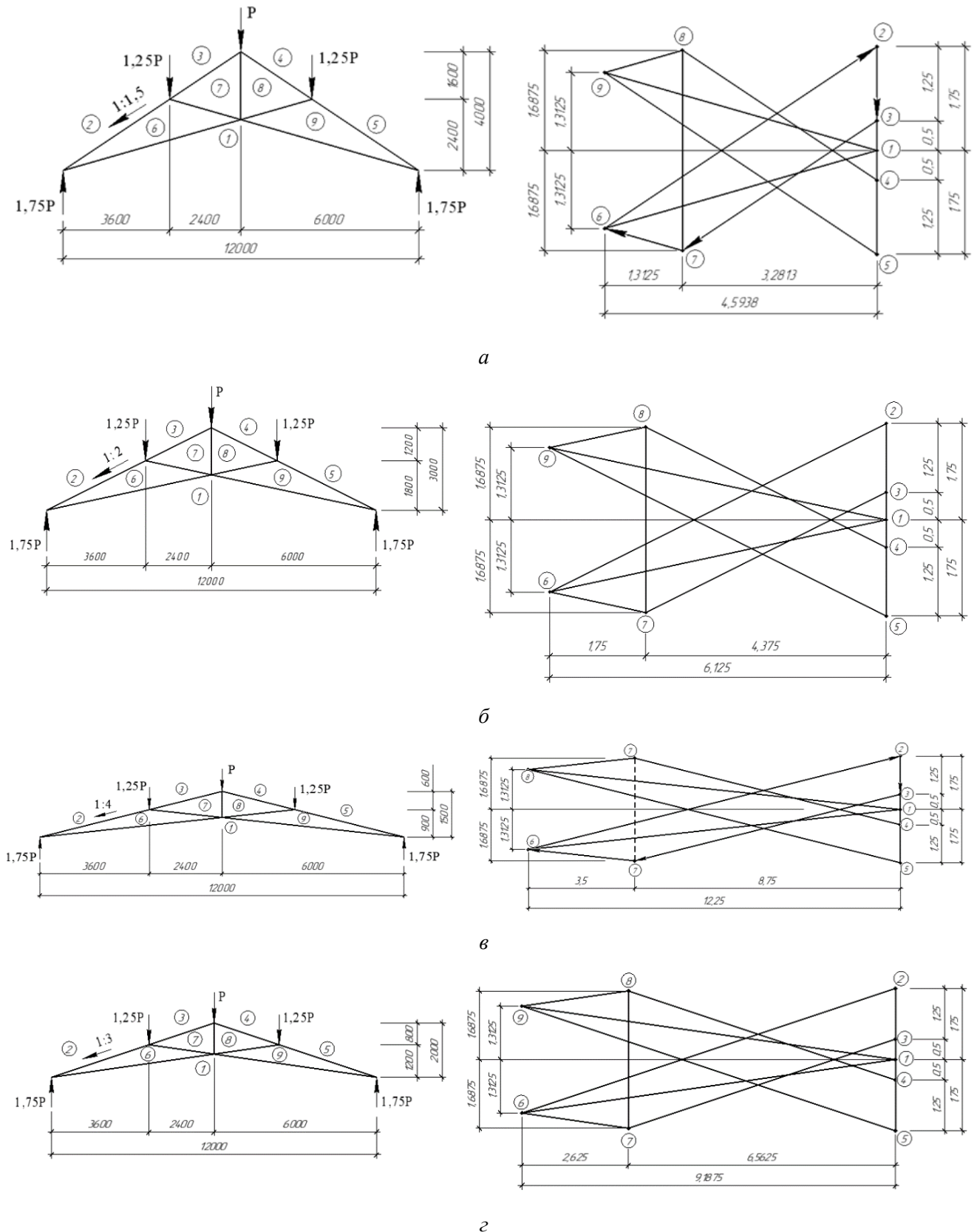


Рис. 3. Диаграмма М-К для фермы пролетом $L = 12$ м:
 $a - f = 4$ м ($i = 1:1,5$); $б - f = 3$ м ($i = 1:2$); $в - f = 2$ м ($i = 1:3$); $г - f = 1,5$ м ($i = 1:4$)
Figure 3. Maxwell – Cremona diagram (thereafter M–C) of for a truss with span $L = 12$ m:
 $a - f = 4$ m ($i = 1:1.5$); $б - f = 3$ m ($i = 1:2$); $в - f = 2$ m ($i = 1:3$); $г - f = 1,5$ m ($i = 1:4$)

Таблица 1

 Значения усилий N в элементах ферм, установленных по диаграмме М–К

№ элементов	Уклон 1:n								
	1:5	1:3,33	1:2,5	1:2	1:1,67	1:1,43	1:1,25	1:1,11	1:1
	Уклон i , в долях								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1–9 (НП)	15,369	10,292	7,768	6,264	5,270	4,568	4,047	3,647	3,332
1–6 (НП)	15,369	10,292	7,768	6,264	5,270	4,568	4,047	3,647	3,332
2–6 (ВП)	15,616	10,658	8,246	6,848	5,952	5,340	4,902	4,578	4,331
3–7 (ВП)	11,154	7,613	5,890	4,891	4,252	3,815	3,502	3,270	3,094
4–8 (ВП)	11,154	7,613	5,890	4,891	4,252	3,815	3,502	3,270	3,094
5–9 (ВП)	15,616	10,658	8,246	6,848	5,952	5,340	4,902	4,578	4,331
6–7 (Р/НП)	4,391	2,941	2,219	1,790	1,506	1,305	1,156	1,042	0,952
7–8 (Р/НП)	3,375	3,375	3,375	3,375	3,375	3,375	3,375	3,375	3,375
8–9 (Ст)	4,391	2,941	2,219	1,790	1,506	1,305	1,156	1,042	0,952

Примечание: НП – нижний пояс конструкции; ВП – верхний пояс конструкции; Р/НП – элементы решетки, являющиеся продолжением ветвей НП; Ст – стойка.

Table 1

 Values of forces N in the elements of the trusses assigned according to the M–C diagram

Number of elements	Slope 1:n								
	1:5	1:3.33	1:2.5	1:2	1:1.67	1:1.43	1:1.25	1:1.11	1:1
	Slope i , in fractions								
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1–9 (LB)	15.369	10.292	7.768	6.264	5.270	4.568	4.047	3.647	3.332
1–6 (LB)	15.369	10.292	7.768	6.264	5.270	4.568	4.047	3.647	3.332
2–6 (UB)	15.616	10.658	8.246	6.848	5.952	5.340	4.902	4.578	4.331
3–7 (UB)	11.154	7.613	5.890	4.891	4.252	3.815	3.502	3.270	3.094
4–8 (UB)	11.154	7.613	5.890	4.891	4.252	3.815	3.502	3.270	3.094
5–9 (UB)	15.616	10.658	8.246	6.848	5.952	5.340	4.902	4.578	4.331
6–7 (S/LB)	4.391	2.941	2.219	1.790	1.506	1.305	1.156	1.042	0.952
7–8 (G/LB)	3.375	3.375	3.375	3.375	3.375	3.375	3.375	3.375	3.375
8–9 (R)	4.391	2.941	2.219	1.790	1.506	1.305	1.156	1.042	0.952

Note: LB – lower belt of the structure; UP – upper belt of the structure; G/LB – grid elements, which are extensions of LB branches; R – rack.

Таблица 2

 Отношения значений усилий в каждом элементе фермы к соответствующему минимальному значению N_i/N_{\min}

№ элементов	Уклон 1:n								
	1:5	1:3,33	1:2,5	1:2	1:1,67	1:1,43	1:1,25	1:1,11	1:1
	Уклон i , в долях								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1–6, 1–9 (НП)	4,613	3,089	2,331	1,880	1,582	1,371	1,215	1,095	1,0
2–6, 5–9 (ВП)	3,606	2,461	1,904	1,581	1,374	1,233	1,132	1,057	1,0
3–7, 4–8 (ВП)	3,606	2,461	1,904	1,581	1,374	1,233	1,132	1,057	1,0
6–7, 8–9 (Р/НП)	4,613	3,089	2,331	1,880	1,582	1,371	1,215	1,095	1,0
7–8 (Ст)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Примечание: НП – нижний пояс конструкции; ВП – верхний пояс конструкции; Р/НП – элементы решетки, являющиеся продолжением ветвей НП; Ст – стойка.

Table 2

The ratio of the force values in each truss element to the corresponding minimal value N_i/N_{min}

Number of elements	Slope 1:n								
	1:5	1:3.33	1:2.5	1:2	1:1.67	1:1.43	1:1.25	1:1.11	1:1
	Slope i , in fractions								
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
1–6, 1–9 (LB)	4.613	3.089	2.331	1.880	1.582	1.371	1.215	1.095	1.0
2–6, 5–9 (UB)	3.606	2.461	1.904	1.581	1.374	1.233	1.132	1.057	1.0
3–7, 4–8 (UB)	3.606	2.461	1.904	1.581	1.374	1.233	1.132	1.057	1.0
6–7, 8–9 (G/LB)	4.613	3.089	2.331	1.880	1.582	1.371	1.215	1.095	1.0
7–8 (R)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Note: LB – lower belt of the structure; UP – upper belt of the structure; G/LB – grid elements, which are extensions of LB branches; R – rack.

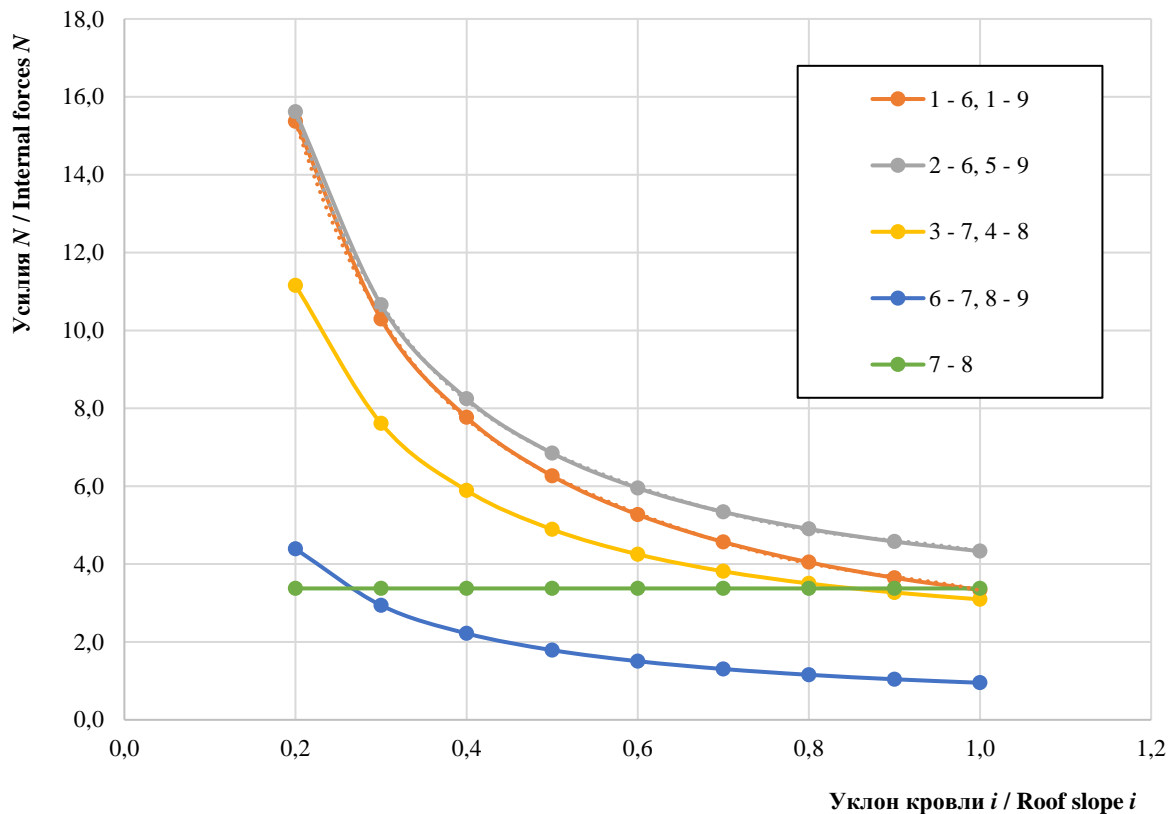


Рис. 4. Диаграмма значений продольных усилий N в элементах фермы от единичной нагрузки ($P = 1$) в зависимости от уклона кровли
 Figure 4. Diagram of the values of longitudinal forces N in the truss elements from a singular load ($P = 1$) depending on the roof slope

Таблица 3

Приращения усилий для каждого шага изменения уклона кровли i

№ элементов	Уклон 1:n								
	1:5	1:3,33	1:2,5	1:2	1:1,67	1:1,43	1:1,25	1:1,11	1:1
	Уклон i , в долях								
	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	1,000
1–6, 1–9 (НП)	5,076	2,524	1,504	0,994	0,703	0,521	0,400	0,315	
2–6, 5–9 (ВП)	4,958	2,412	1,398	0,896	0,612	0,438	0,324	0,247	
3–7, 4–8 (ВП)	3,541	1,723	0,999	0,640	0,437	0,313	0,232	0,176	
6–7, 8–9 (Р/НП)	1,450	0,721	0,430	0,284	0,201	0,149	0,114	0,090	
7–8 (Ст)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	

Примечание: НП – нижний пояс конструкции; ВП – верхний пояс конструкции; Р/НП – элементы решетки, являющиеся продолжением ветвей НП; Ст – стойка.

The force increments for each step of the changing in roof slope i

Number of elements	Slope 1:n								
	1:5	1:3.33	1:2.5	1:2	1:1.67	1:1.43	1:1.25	1:1.11	1:1
	Slope i , in fractions								
	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
1–6, 1–9 (LB)	5.076	2.524	1.504	0.994	0.703	0.521	0.400	0.315	
2–6, 5–9 (UB)	4.958	2.412	1.398	0.896	0.612	0.438	0.324	0.247	
3–7, 4–8 (UB)	3.541	1.723	0.999	0.640	0.437	0.313	0.232	0.176	
6–7, 8–9 (G/LB)	1.450	0.721	0.430	0.284	0.201	0.149	0.114	0.090	
7–8 (R)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Note: LB – lower belt of the structure; UP – upper belt of the structure; G/LB – grid elements, which are extensions of LB branches; R – rack.

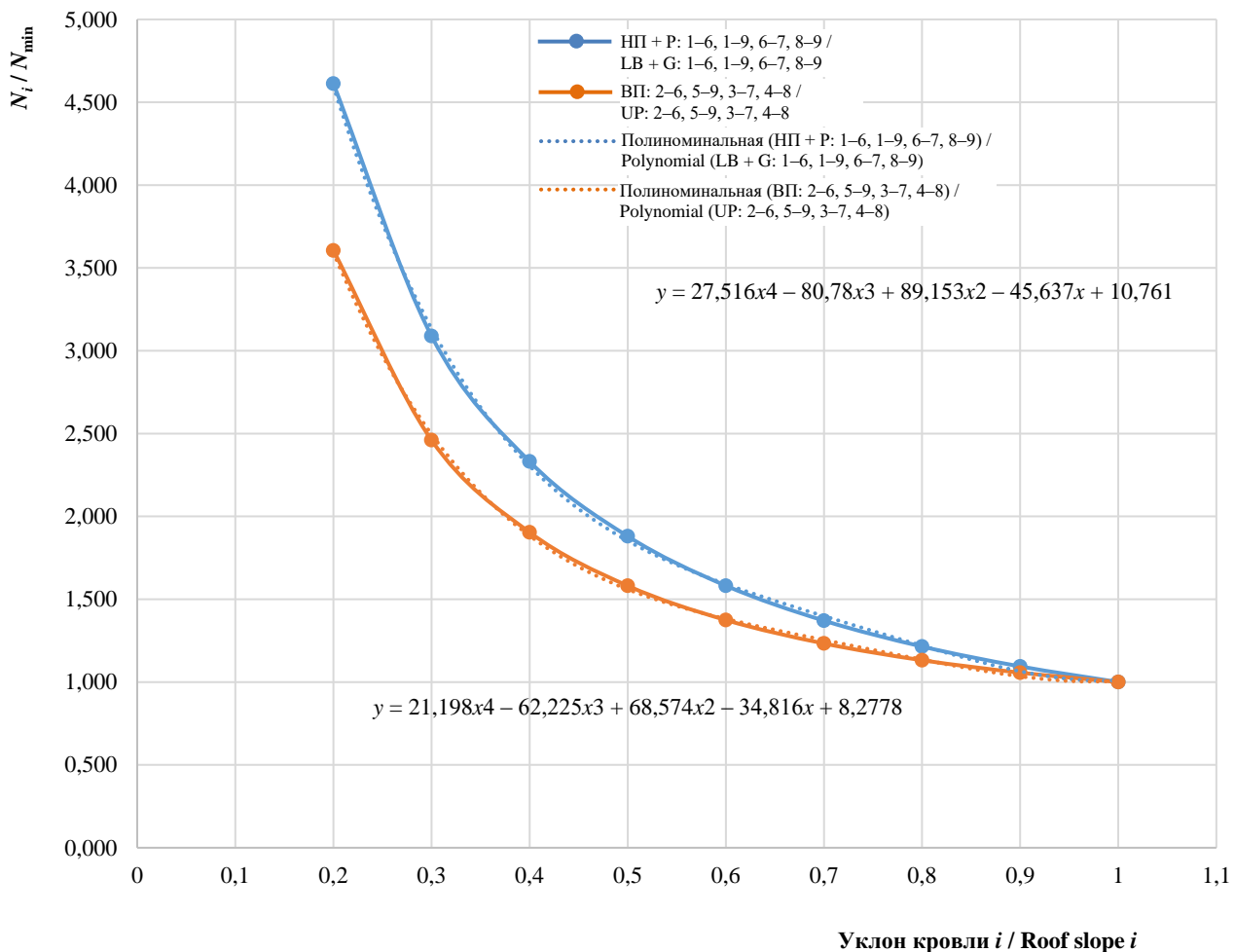


Рис. 5. Диаграмма величин отношения значений усилий в элементах фермы N_i к их минимальному значению N_{\min} (НП + Р – нижний пояс и решетка; ВП – верхний пояс) /

Figure 5. Diagram of the ratio of force values in the truss elements N_i to their minimum value N_{\min} (LB + G – lower belt and grid; UB – upper belt)

Результаты аппроксимации показывают, что для характера возрастания усилий в элементах нижнего пояса фермы и решетки (кроме стойки) справедлива следующая функциональная зависимость (рис. 5):

$$y_1 = 27,516x^4 - 80,78x^3 + 89,153x^2 - 45,637x + 10,761. \quad (1)$$

Степень возрастания усилий в элементах верхнего пояса фермы характеризуется функцией

$$y_2 = 21,198x^4 - 62,225x^3 + 68,574x^2 - 34,816x + 8,2778. \quad (2)$$

Как известно, ускорение возрастания или убывания функции характеризуется ее производной. Тогда производная функции (1) примет вид

$$y_1' = 110,064x^3 - 242,34x^2 + 178,31x - 45,637. \quad (3)$$

Производная функции (2) будет иметь вид

$$y_2' = 84,792x^3 - 186,68x^2 + 137,15x - 34,816. \quad (4)$$

На рис. 5 приведены графики производных функций y_1' и y_2' , представленные выражениями (3) и (4). Анализ графиков показывает, что минимальные значения усилий в элементах фермы возникают при уклонах верхнего пояса конструкции в диапазоне $i = 0,6-1,0$. Этот диапазон и будет являться областью его эффективных значений (рис. 6).

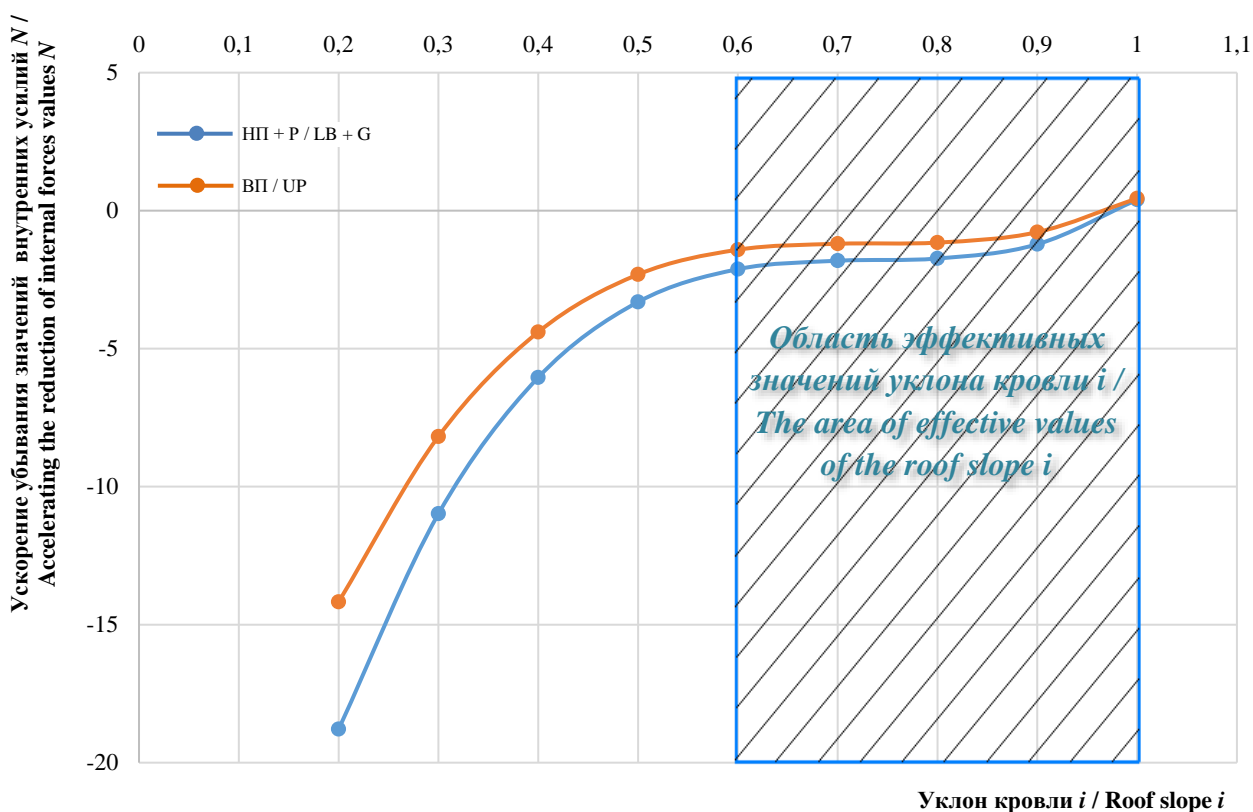


Рис. 6. Графики производных функций, характеризующих ускорение изменения усилий в элементах ферм в зависимости от уклона кровли

Figure 6. Graphs of derivative functions characterizing the acceleration of force changes in truss elements depending on the roof slope

Результаты проведенного исследования показывают, что инженеры могут варьировать форму диаграммы усилий $M-K$ по своему усмотрению и тем самым регулировать жесткостные характеристики элементов конструкции, при этом существует возможность визуализировать процесс работы графически.

Растущий спрос на изготовление конструкций с эффективным использованием материалов требует применения интуитивно понятных инструментов, позволяющих проектировщикам использовать взаимосвязь между формой конструкции и усилиями в ее элементах на начальных стадиях процесса проектирования. Учитывая современные возможности автоматизированного проектирования, решение поставленных задач при помощи диаграммы Максвелла – Кремоны становится достаточно быстрым и наглядным.

Изначально рассчитывать ферму удобнее и быстрее в специализированных расчетных комплексах, но затем, пользуясь графическим методом определения усилий М–К, можно проверять варианты уклона кровли в поиске рационального решения конструкции фермы типа «ножницы».

4. Заключение

Предложен алгоритм поиска эффективного конструктивного решения ферм типа «ножницы». В результате геометрическая основа преобразуется в вычислительную, которая позволяет в режиме реального времени плавно проводить аппроксимацию и вычислять усилия в элементах. Установлена зависимость значений усилий от величины стрелы подъема: изменение координаты точек (абсцисс) диаграммы обратно пропорционально изменению f .

Выявлено, что по мере уменьшения уклона кровли значения приращений усилий в элементах фермы на каждом шаге увеличиваются с 27 % в два раза. На основании графического анализа полученных данных определен диапазон эффективных значений уклона кровли, при котором усилия в элементах фермы принимают минимальные значения: $i = 0,6–1,0$. Таким образом, предлагаемый метод способствует выбору более экономичных конструктивных решений.

Проведенный расчет методом Максвелла – Кремоны продемонстрировал, что современный уровень развития математических алгоритмов для строительных конструкций дает возможность находить рациональные конструктивные решения графическим способом.

Но если САЕ-системы позволяют корректировать конечноэлементную модель путем масштабирования для придания требуемой высоты подъема f , то изменение положения точек примыкания ветвей нижнего пояса к верхнему более трудоемко. Следующий этап исследований будет посвящен изучению зависимости значений усилий в элементах ферм типа «ножницы» от положения точек сопряжения ветвей нижнего пояса с верхним (регулируется соотношением a/b , см. рис. 1).

Список литературы / References

1. Kromoser B., Braun M., Ortner M. Construction of all-wood trusses with plywood nodes and wooden pegs: a strategy towards resource-efficient timber construction. *Applied Sciences*. 2021;11(6):2568. <https://doi.org/10.3390/app11062568>
2. Roshchina S.I., Lukin M.V., Lukina A.V., Lisyatnikov M.S. Increased performance properties wood weakened bio-deterioration by modifying the adhesive composition based on an epoxy resin. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2014;(4):182–184. (In Russ.)
Рощина С.И., Лукин М.В., Лукина А.В., Лисятников М.С. Повышение эксплуатационных свойств древесины, ослабленной биоповреждением, путем модификации клеевой композицией на основе эпоксидной смолы // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 4. С. 182–184.
3. Sergeev M., Rimshin V., Lukin M., Zdravovic N. Multi-span composite beam. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;896:012058. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012058>
4. Ferretti F., Pozza L., Talledo D.A. Robustness analysis of historical timber roofs: a case study of the Gaggiandre shipyard at the Arsenale of Venice. *Buildings*. 2022;12(11):1773. <https://doi.org/10.3390/buildings12111773>
5. Lisitsky I.I., Zhadanov V.I., Rudnev I.V. Wooden trusses with nodal joints on glued flat rods. *Industrial and Civil Engineering*. 2020;(4):9–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.04.09-15>
Лисицкий И.И., Жаданов В.И., Руднев И.В. Деревянные фермы с узловыми соединениями на клеенных плоских стержнях // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 4. С. 9–15. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.04.09-15>
6. Nasiri B., Piccardo C., Hughes M. Estimating the material stock in wooden residential houses in Finland. *Waste Management*. 2021;135(1):318–326. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.007>
7. Kuda D., Petříčková M. Modular timber gridshells. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2021;28(1):72–79. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.28.1.27617>
8. Xu Z., Cui Y., Li B. Truss structure optimization design based on FE-PSO-SQP algorithm. In: Kountchev R., Mironov R., Nakamatsu K. (eds.) *New Approaches for Multidimensional Signal Processing. NAME SP2022. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022;332:151–158. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7842-5_14
9. Wang S., Ma Y., Deng Z. Stretching-dominated truss lattice materials: elastic anisotropy evaluation, control, and design. *Composite Structures*. 2022;298(2):116004. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116004>
10. Zhidkov K.E., Zverev V.V., Kapyrin N.V. Experimental full-scale studies of wooden trusses on metal serrated plates. *Structural Mechanics and Structures*. 2021;(4):90–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.31.4.008>
Жидков К.Е., Зверев В.В., Капырин Н.В. Экспериментальные натурные исследования деревянных ферм на металлических зубчатых пластинах // Строительная механика и конструкции. 2021. № 4 (31). С. 90–98. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.31.4.008>

11. Xia Y., Langelaar M., Hendriks M.A.N. Optimization-based strut-and-tie model generation for reinforced concrete structures under multiple load conditions. *Engineering Structures*. 2022;266:114501. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114501>
12. He L., Li Q., Gilbert M., Shepherd P., Rankine C., Pritchard T., Reale V. Optimization-driven conceptual design of truss structures in a parametric modelling environment. *Structures*. 2022;37:469–482. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.048>
13. Massafra A., Prati D., Predari G., Gulli R. Wooden truss analysis, preservation strategies, and digital documentation through parametric 3D modeling and HBIM workflow. *Sustainability*. 2020;12(12):4975. <https://doi.org/10.3390/su12124975>
14. Medwadowski S.J. Aesthetics of wood structures. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. 1983;26–2(88):31–50.
15. Kholodar B.G. Determination of truss stress-strain state with Cremona – Maxwell diagram. *Vestnik of Brest State Technical University*. 2016;(1):39–42. (In Russ.) Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36945943_89428079.pdf (accessed: 15.12.2022).
Холодарь Б.Г. Определение напряженно-деформированного состояния фермы с использованием диаграммы Максвелла – Кремоны // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. 2016. № 1 (97). С. 39–42. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36945943_89428079.pdf (дата обращения: 15.12.2022).
16. Millar C., McRobie A., Baker W.F. A graphical method for determining truss stability. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. 2020;61(4):285–295. <https://doi.org/10.20898/j.iass.2020.011>
17. Khokhlov A.V. Properties of loading and unloading diagrams generated by a nonlinear maxwell-type determining relation for rheonomic materials. *Journal of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences*. 2018;22(2):293–324. (In Russ.) <https://doi.org/10.14498/vsgtu1573>
18. Хохлов А.В. Свойства диаграмм нагружения и разгрузки, порождаемых нелинейным определяющим соотношением типа максвелла для реономных материалов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2018. Т. 22. № 2. С. 293–324. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1573>
18. Kromoser B., Braun M., Ortner M. Construction of all-wood trusses with plywood nodes and wooden pegs: a strategy towards resource-efficient timber construction. *Applied Sciences*. 2021;11(6):2568. <https://doi.org/10.3390/app11062568>
19. Beghini L.L., Carrion J., Beghini A., Mazurek A., Baker W.F. Structural optimization using graphic statics. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2013;49:351–366. <https://doi.org/10.1007/s00158-013-1002-x>
20. Millar C.G., McRobie A. Graphic stability of generalised motions. *International Journal of Solids and Structures*. 2022;256:111787. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2022.111787>