

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-34-49

\*Василькин А.А., Зубков Г.В

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

\*E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ НАВЕСА ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

**Аннотация.** В статье поставлена и решена задача поиска минимальной массы конструкции навеса при заданных конструктивной схеме и условиях нагружения. При этом, рассматривалось два варианта конструктивной схемы – с длиной навеса 3 и 6 м. В качестве критерия оптимальности принята металлоемкость конструкции. В качестве варьируемых параметров были выбраны форма поперечного сечения балки, прочностные характеристики материала конструкции и геометрические параметры конструкции. Задача решалась численным методом, для этого, методами строительной механики определены усилия в элементах конструкции, перемещения и прогибы балки и подвеса, затем полученные формальные условия прочности и жесткости были включены в алгоритм, на основе которого разработана программа в одном из языке программирования. Фактически, в статье решалась оптимизационная задача по критерию оптимальности в виде стоимости конструкции, с ограничениями в виде габаритных размеров и условий прочности и жесткости. Такой метод позволит быстро определять НДС конструкции, при заданной расчетной схеме, для любых габаритов, нагрузки и типа применяемых элементов. Данный подход можно рассматривать как одно из приложений ВМ методологии, то есть автоматизировать процесс проектирования конкретной конструкции и может применяться в практической работе, позволяет существенно экономить время проектирования на поиск оптимального решения.

**Ключевые слова:** параметрическая оптимизация, критерий оптимальности, несущая способность, металлоемкость.

**Введение.** На сегодняшний день теория оптимального проектирования строительных конструкций является одним из интенсивно развивающихся разделов строительной механики [1–4]. Практическое применение решений, разработанных в рамках этой теории позволяет снизить затраты на строительство и эксплуатацию объекта и вместе с тем, повысить производительность труда инженера-проектировщика [5]. Такой результат может быть достигнут двумя путями: разработкой или использованием алгоритма, выполняющего оптимизацию любой предложенной строительной конструкции, или выявлением оптимальных параметров определенной конструкции, которые могут включать в себя ее геометрические характеристики, характеристики применяемых материалов, сечение элементов и т.п. В данной статье было решено применить второй способ: выявить оптимальное проектное решение для конструкции навеса.

**Постановка задачи.** В настоящем исследовании определяется оптимальный вариант проектного решения плоской стержневой конструкции методом параметрической оптимизации. Данный метод широко применяется в строительстве [6–8], наряду с эволюционными алгоритмами [1, 9–11]

Критерий оптимальности решения зависит от поставленной задачи и должен быть формализован.

В подавляющем большинстве исследований в роли критерия оптимальности принята металлоемкость конструкции [3, 5, 8, 12]. В данном исследовании было принято решение также использовать металлоемкость в качестве критерия оптимальности.

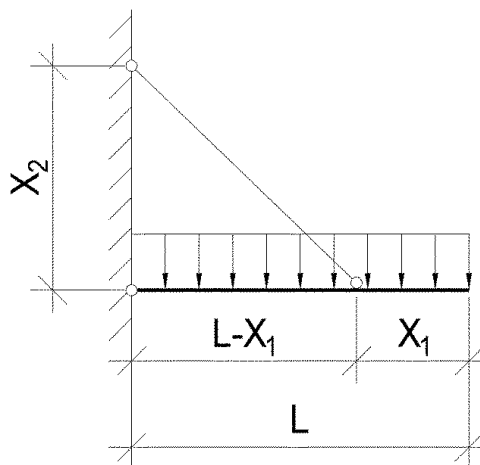


Рис. 1. Расчетная схема исследуемой конструкции

Исследуемая конструкция представляет собой консольную балку с подвесом, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой. На практике такую расчетную схему могут иметь навесы и конструкции покрытия [13]. Тип сечения балки является варьируемым параметром, сечение подвеса – прокат сортовой стальной горячекатаный круглый по ГОСТ 2590-2006. Расчетная схема

конструкции представлена на рис.1. Рассмотрены следующие варианты конструкции: с вылетом  $L=6$  м и максимальной высотой крепления подвеса равной 6 м и с вылетом  $L=3$  м и максимальной высотой крепления подвеса  $X_{2\max}=3$  м. Во всех вариантах расчетная нагрузка была равна

2,1 кН/м, нормативная 1,5 кН/м. Решение задачи осуществляется численным методом, с помощью алгоритма, описанного ниже.

Варьируемые параметры и их значения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения варьируемых параметров

Варьируемые параметры	Значения
Вылет конструкции и максимальная высота крепления подвеса	3, 6 м
Расстояние от края балки до точки крепления подвеса ( $X_1$ )	От 0 до $7/8L$ с шагом $L/8$
Высота крепления подвеса ( $X_2$ )	От $X_{2\max}$ до $X_{2\max}/8$ с шагом $X_{2\max}/8$
Класс стали	C245, C285, C345
Тип сечения балки	Труба стальная электросварная прямошовная по ГОСТ 10704-91
	Труба стальная профильная по ГОСТ 32913-2015 – квадратная (по прил. А)
	Труба стальная профильная по ГОСТ 32913-2015 – прямоугольная (по прил. Б)
	Швеллер стальной горячекатаный с параллельными гранями полок по ГОСТ 8240-97
	Двутавр стальной горячекатаный с параллельными гранями полок по ГОСТ Р 57837-2017

Алгоритм расчета. Методика расчета реализована в программной среде Microsoft Visual Studio на языке программирования C#. Расчет производился в соответствии с требованиями СП 16.13330.2017 "Стальные конструкции".

Автоматизация оптимального проектирования чаще всего возможна на основе использования мощных коммерческих комплексов [14]. Также в исследовательской практике стали появляться работы по оптимизации тех или иных конструкций, для расчета которых создается отдельная небольшая программа на одном из языков программирования, учитывающая специфику конкретной конструкции [5]. Данное направление можно рассматривать как одно из проявлений BIM технологий.

На первом этапе расчета задаются значения варьируемых параметров: геометрические характеристики конструкции, закон их изменения, свойства материала конструкции, тип используемого сечения.

На втором этапе происходит расчет напряженно-деформированного состояния конструкции. Программой вычисляются моменты и продольные силы в двух критических точках – в середине пролета между опорой балки и точкой крепления подвеса и на свободном конце консоли.

Далее происходит итерационный подбор сечения элементов. Для подбора используются заранее введенные в алгоритм сортаменты. Особенность алгоритма заключается в том, что для первого расчета принимается профиль с наименьшей массой 1 метра. Затем производится анализ несущей способности сечения по I и II группе предельных состояний. Напряженно-деформированное состояние части балки между опорой и точкой подвеса рассматривается в виде изгиба со сжатием, консольной части балки – в виде изгиба. Прогибы в двух точках балки определяются по следующим формулам [15]:

Формула для прогиба в середине пролета:

$$\omega_1 = -\frac{ql^4}{384EI} \left( 5 - 12 \frac{X_1^2}{l^2} \right), \quad (1)$$

где  $l = L - X_1$ ;

Формула для прогиба на конце консоли:

$$\omega_2 = -\frac{qX_1^4}{24EI} \left( 3 + 4 \frac{l}{X_1} - \frac{l^3}{X_1^3} \right), \quad (2)$$

где  $l = L - X_1$ ;

При недостаточной несущей способности профиля принимается следующий по массе профиль, и так далее. Подобный алгоритм позволяет обеспечить подбор профиля минимальной массы.

На следующем шаге вычисляется продольная сила в подвесе и происходит подбор его сечения по принципу, подобному принципу подбора сечения балки.

После этого по заданному закону, в соответствии с диапазоном вариации, приведенному в таблице 1 автоматически меняется геометрия конструкции и алгоритм подбора сечений повторяется. После расчета всех предусмотренных вариантов подобранные профили, вычисленная масса конструкции и другие необходимые для анализа данные записываются в текстовый файл и алгоритм завершает работу.

В итоге, предоставленный алгоритм выполняет подбор сечений для 64 вариантов конструкции (8 вариантов расстояния от края балки до точки крепления подвеса и 8 вариантов высоты

крепления подвеса). Подобный расчет выполняется для всех вариантов класса стали, типа поперечного сечения балки и вылета конструкции. Всего в процессе решения оптимизационной задачи рассматривается 1536 вариантов проектного решения конструкции (64 варианта геометрической конфигурации, 3 класса стали, 4 типа поперечного сечения балки, 2 варианта вылета конструкции)

Анализ результатов. Результаты расчета представлены в таблице 2. Для навеса вылетом 3 метра наиболее оптимальным сечением балки являются: прямоугольная труба при классах стали С245 и С285 и круглая труба при классе стали С345. Для навеса вылетом 6 метров при всех классах стали наиболее оптимальным сечением является круглая труба.

Таблица 2

Масса наиболее оптимального проектного варианта для каждого типа сечения

	L = 3 м			L = 6 м		
	C245	C285	C345	C245	C285	C345
Круглая труба	7,75	6,96	<u>6,21</u>	<u>35,64</u>	<u>32,13</u>	<u>31,64</u>
Квадратная труба	8,60	8,48	8,40	50,57	50,32	49,83
Прямоугольная труба	<u>7,40</u>	<u>6,59</u>	6,51	42,11	41,86	41,37
Швеллер	15,13	–	–	54,05	–	–
Двутавр	24,91	–	–	51,11	–	–

Швеллер и двутавр являются наименее оптимальными типами сечений. Это можно объяснить тем, что сечения в сортаменте этих профилей располагаются с большим «шагом» по несущей способности, что вызывает неполное использование несущей способности профиля (в особенности на вылете 3 м) и не позволяет подобрать оптимальное сечение.

Так, при использовании двутавра, в наиболее оптимальном по металлоемкости варианте конструкции процент использования несущей способности равен 14 % по 1-ой группе ПС, 5 % по 2-ой группе ПС при вылете 3 м и 53 % по 1-ой группе ПС, 57 % по 2-ой группе ПС при вылете 6 м (при классе стали С245). При этом в обоих случаях принимается профиль 10Б1 – наименее прочный в сортаменте.

При использовании швеллера возникает подобная ситуация. При вылете 3 м (класс стали С245) в наиболее оптимальном по металлоемкости варианте конструкции принимается профиль 5П, наименее прочный в сортаменте, и процент использования его несущей способности равняется 50 % по 1-ой группе ПС и 40 % по 2-ой группе ПС. При вылете 6 м (класс стали С245) принимается профиль 10П, процент использования его несущей способности составляет 52 % по 1-ой группе ПС и 55 % по 2-ой группе ПС.

Квадратные, прямоугольные и круглые трубы обладают более «частым» сортаментом,

чем двутавр и швеллер. Это позволяет подбирать более оптимальные сечения с высоким процентом использования несущей способности.

Квадратная профильная труба среди трех вышеперечисленных профилей является наименее оптимальным сечением для использования в исследуемой конструкции. Это связано с менее выгодным распределением массы по сравнению с прямоугольной профильной трубой, а также отсутствием в сортаменте тонкостенных сечений, как у круглых труб. Так, например, при вылете 3 м и классе стали С245 в наиболее оптимальном по металлоемкости варианте конструкции принимаются следующие сечения: квадратная профильная труба 45×45×2, прямоугольная профильная труба 60×40×1,5 и круглая труба  $\varnothing 70 \times 1,4$ . Сравнивая их характеристики видно, при большей массе квадратная труба имеет меньшие характеристики несущей способности. Вследствие этого масса конструкции при ее применении больше, чем при использовании других профилей. На рисунках 6–11 показана зависимость массы конструкции от ее геометрических характеристик при использовании квадратной профильной трубы. Как видно из графиков, при повышении класса стали масса оптимального варианта конструкции изменяется незначительно. Это связано с тем, что в этом случае сечения подбираются по 2-ой группе ПС. Так, при вылете 3 м при классах стали С245, С285, С345 принимается

сечение 45×45×2 мм, процент использования несущей способности по 1-ой группе ПС составляет соответственно 99 %, 84 %, и 71 %, по 2-ой группе ПС 89 % по всех случаях. При вылете 6 м при классах стали С245, С285, С345 принимается сечение 90×90×3 мм, процент использования несущей способности по 1-ой группе ПС составляет соответственно 64 %, 55 %, и 46 %, по 2-ой группе ПС 77 % по всех случаях. Незначительное

снижение массы конструкции при повышении класса стали связано с изменением сечения подвеса, которое, однако, слабо влияет на общую массу конструкции. Можно сделать вывод, что увеличение класса стали при использовании квадратной профильной трубы нецелесообразно, поскольку повышает стоимость конструкции, практически не снижая ее металлоемкости.

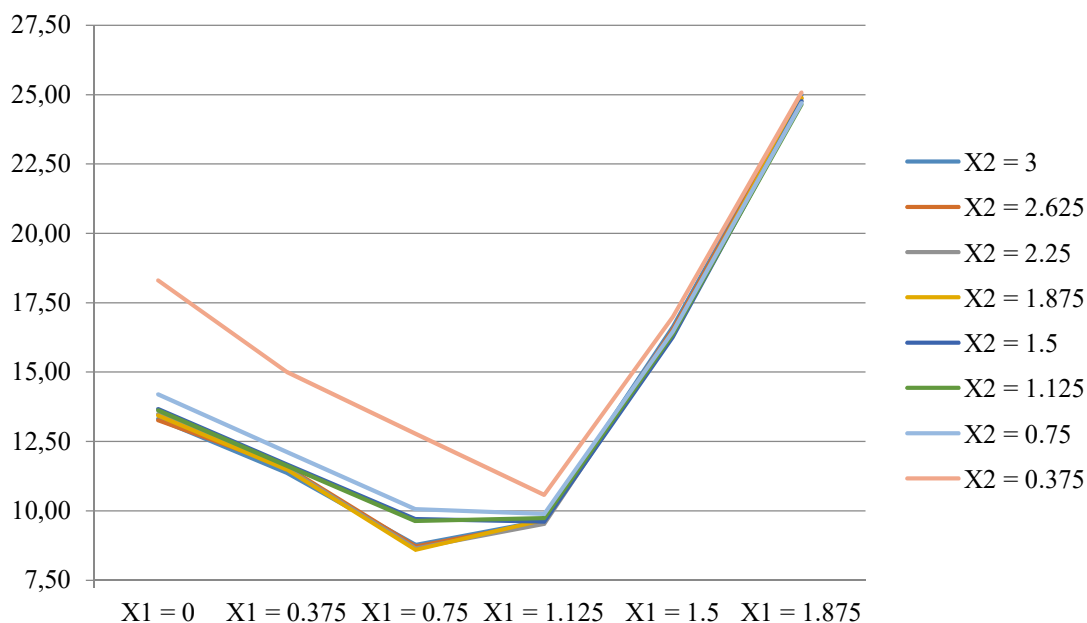


Рис. 6. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (квадратная труба, сталь С245, вылет 3 м), кг

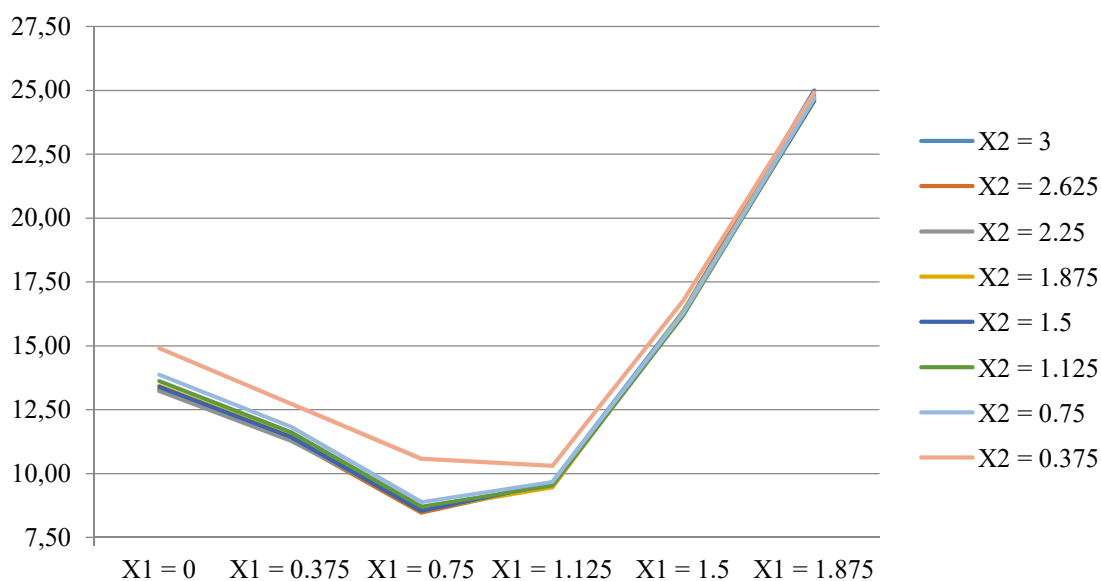


Рис. 7. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (квадратная труба, сталь С285, вылет 3 м), кг

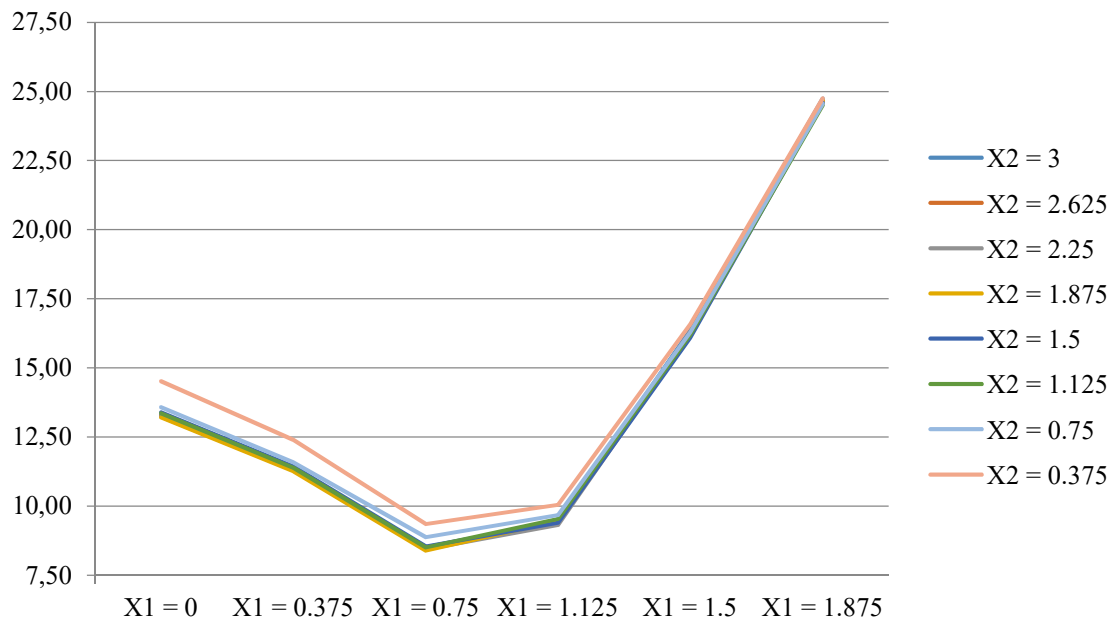


Рис. 8. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (квадратная труба, сталь С345, вылет 3 м), кг

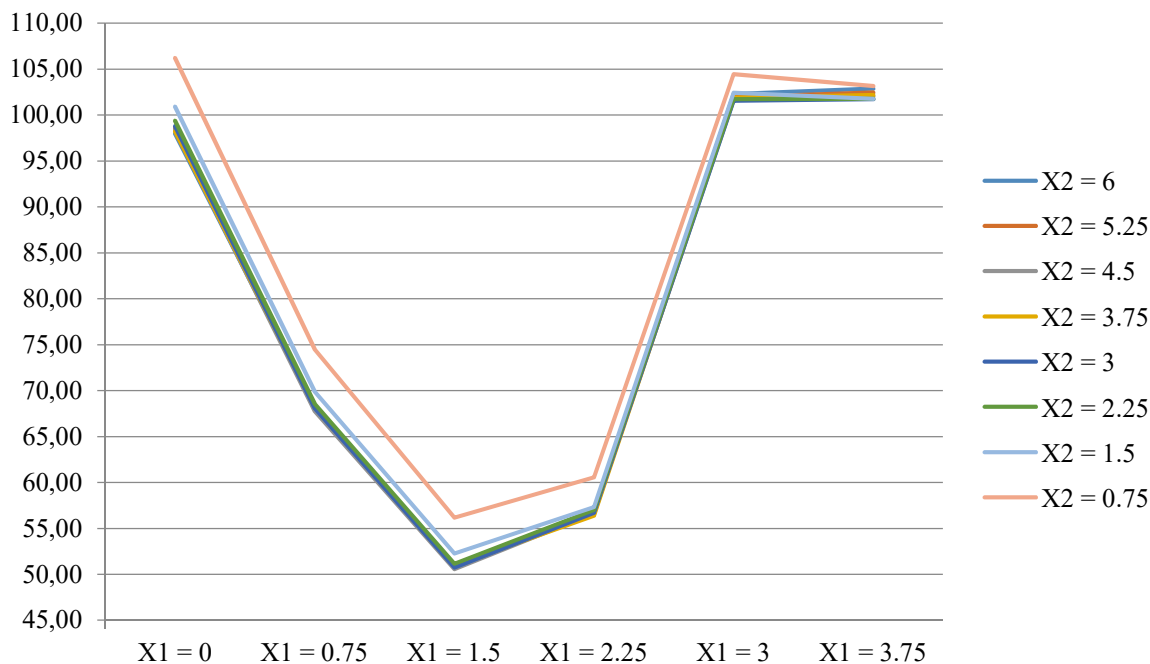


Рис. 9. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (квадратная труба, сталь С245, вылет 6 м), кг

Прямоугольная профильная труба является одним из наиболее оптимальных сечений для исследуемой конструкции. При одинаковой массе и

габаритах ее прочностные и жесткостные характеристики превосходят таковые у круглых труб. Сравнение двух схожих профилей прямоугольного и круглого сечения приведено в таблице 3.

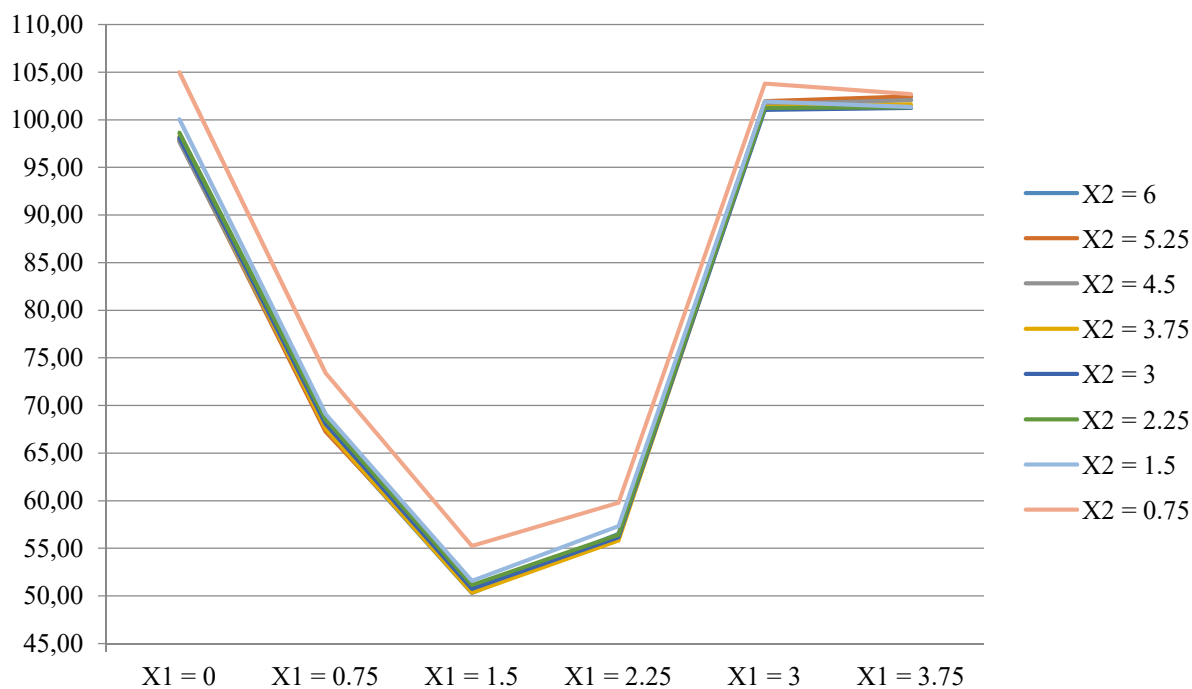


Рис. 10. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (квадратная труба, сталь С285, вылет 6 м), кг

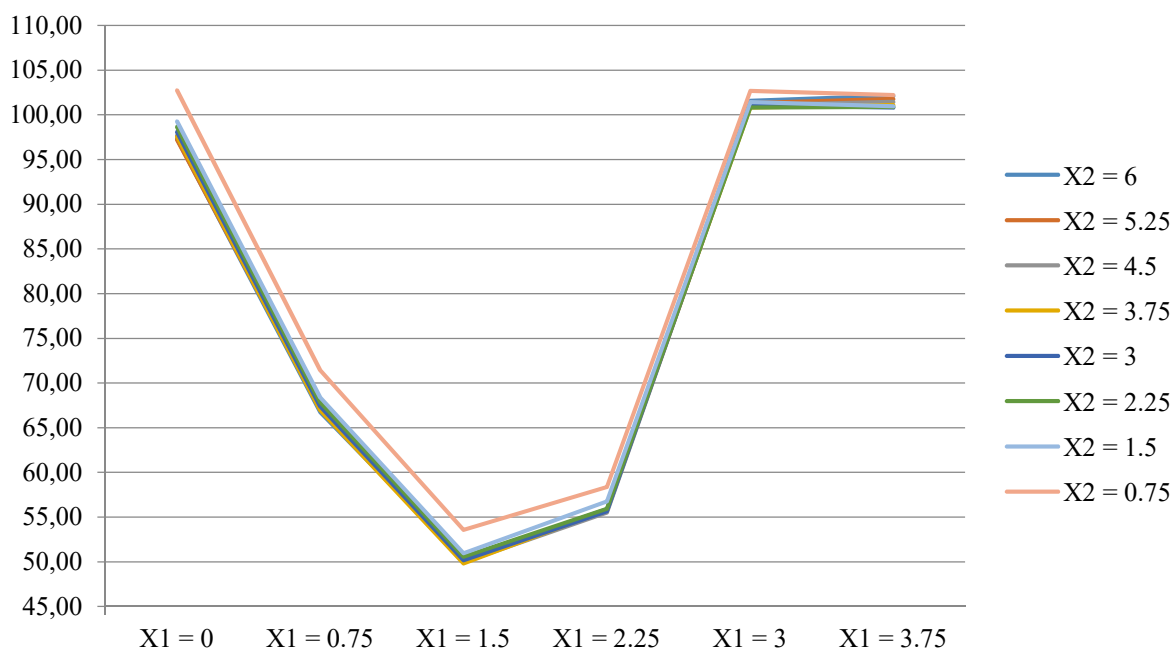


Рис. 11. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (квадратная труба, сталь С345, вылет 6 м), кг

Таблица 3

**Сравнение характеристик профилей**

Профиль	Момент сопротивления $W$ , $\text{см}^3$	Момент инерции $I$ , $\text{см}^4$	Масса 1 п.м. профиля, кг/м
60×30×1,5	4,00	11,99	2,02
∅60×1,4	3,69	11,06	2,02

Таким образом, теоретически, прямоугольная труба является наиболее оптимальным профилем с точки зрения соотношения массы и прочностных характеристик, при этом обладая достаточно обширным сортаментом, что позволяет подбирать оптимальное сечение с большим процентом использования несущей способности.

Расчеты отчасти подтверждают это предположение. Так, при вылете 3 м прямоугольная

профильная труба является оптимальным сечением в двух случаях из трех.

На рисунках 12-17 показана зависимость массы конструкции от ее геометрических характеристик при использовании прямоугольной профильной трубы. Принятые при различных вылетах и классах стали профили и проценты использования их несущей способности приведены в таблице 4.

Таблица 4

Процент использования несущей способности принятых сечений

Вылет, м	Класс стали	Профиль	1-ая ГПС, %	2-ая ГПС, %
3	C245	60×40×1,5	96	63
	C285	60×30×1,5	96	77
	C345	60×30×1,5	81	77
6	C245	100×50×3	85	92
	C285	100×50×3	72	92
	C345	100×50×3	61	92

Как видно из таблицы и графиков, повышение класса стали с C245 до C285 при вылете 3 м приводит к уменьшению металлоемкости конструкции. Дальнейшее же увеличение класса стали ее не уменьшает. Такая же ситуация наблюдается при вылете 6 м. Это связано с тем,

что несущая способность сечения ограничена его жесткостными характеристиками, которые не повышаются при увеличении класса стали. Таким образом, увеличение класса стали свыше C345 для сечения в виде прямоугольной профильной трубы в целом нецелесообразно.

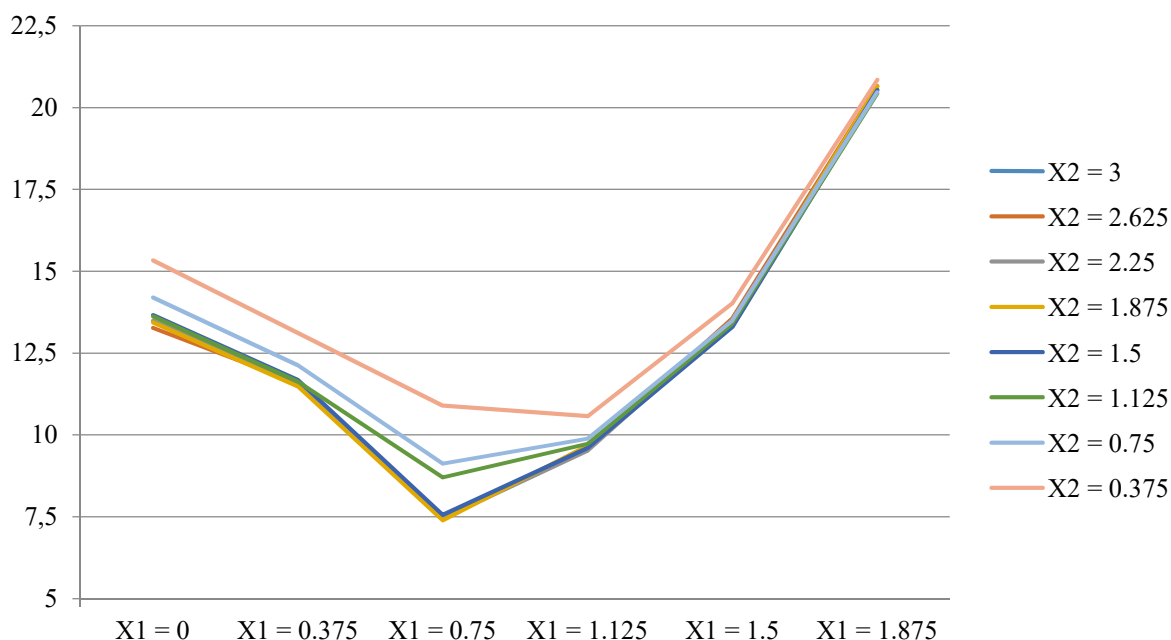


Рис. 12. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (прямоугольная труба, сталь C245, вылет 3 м), кг

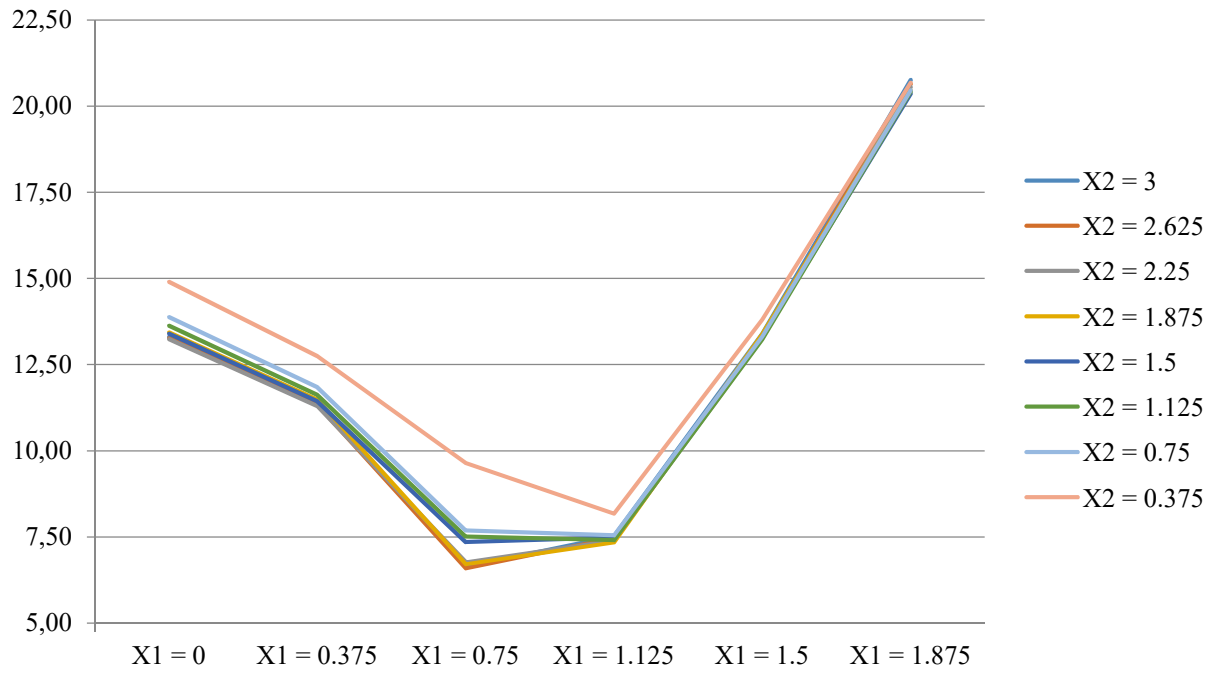


Рис. 13. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (прямоугольная труба, сталь С285, вылет 3 м), кг

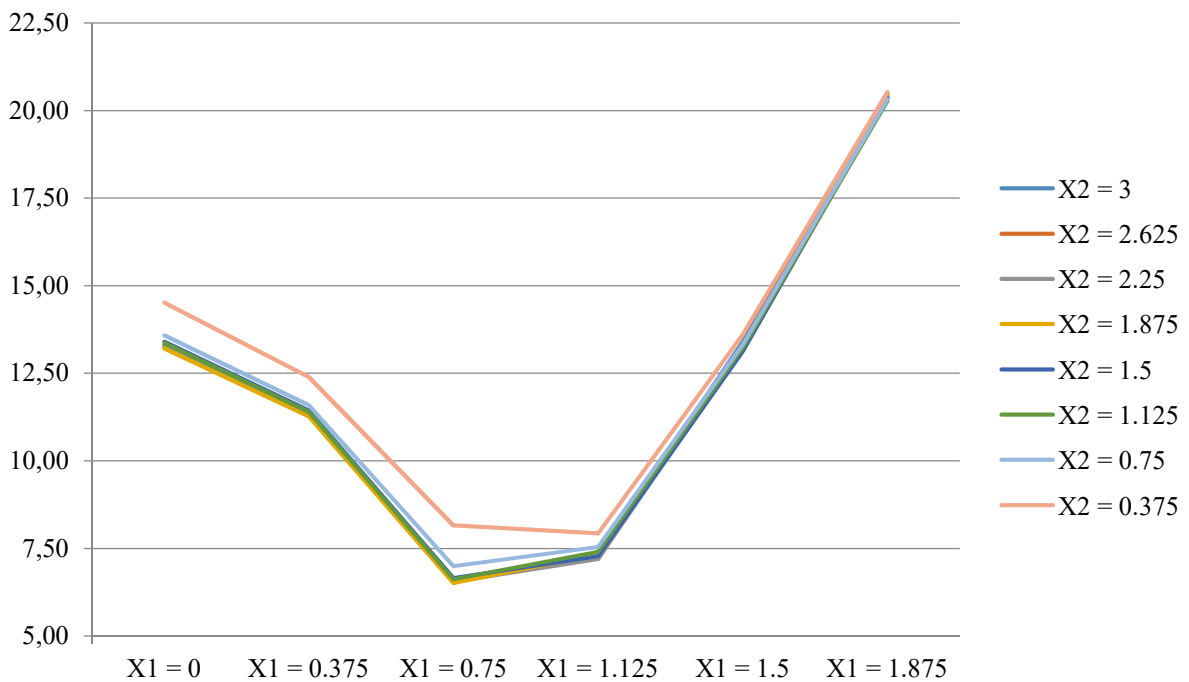


Рис. 14. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (прямоугольная труба, сталь С345, вылет 3 м), кг



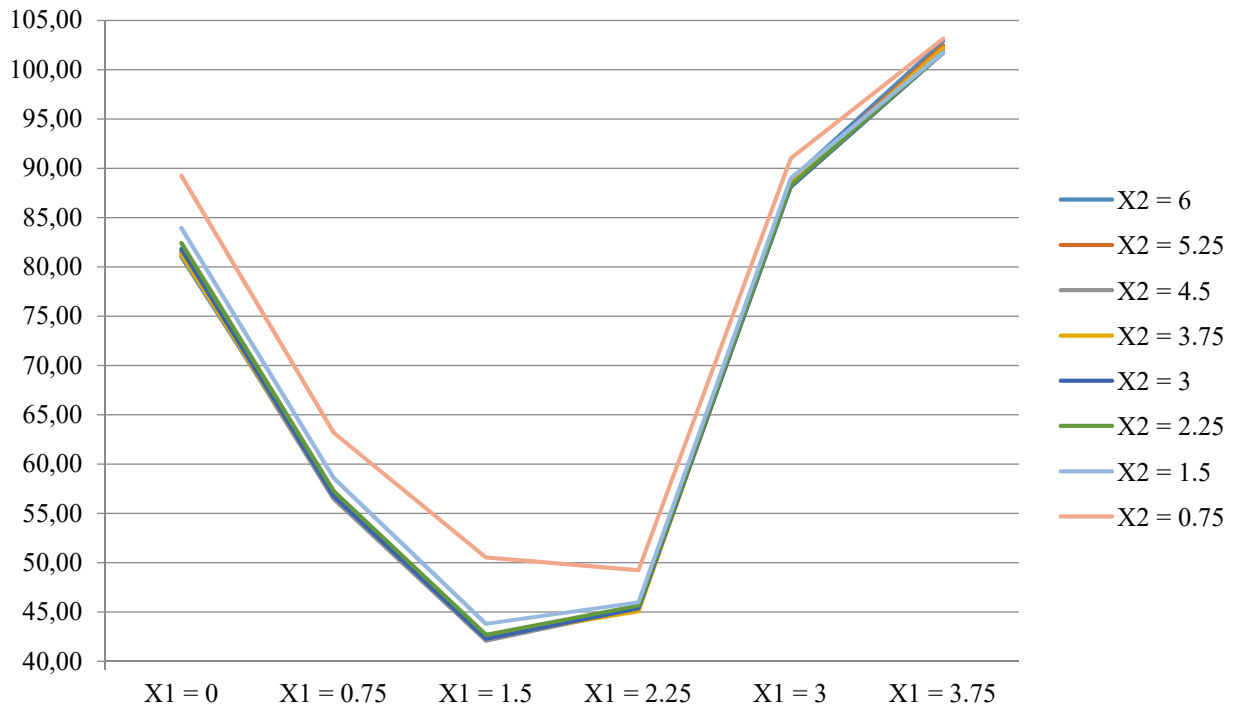


Рис. 15. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (прямоугольная труба, сталь С245, вылет 6 м), кг

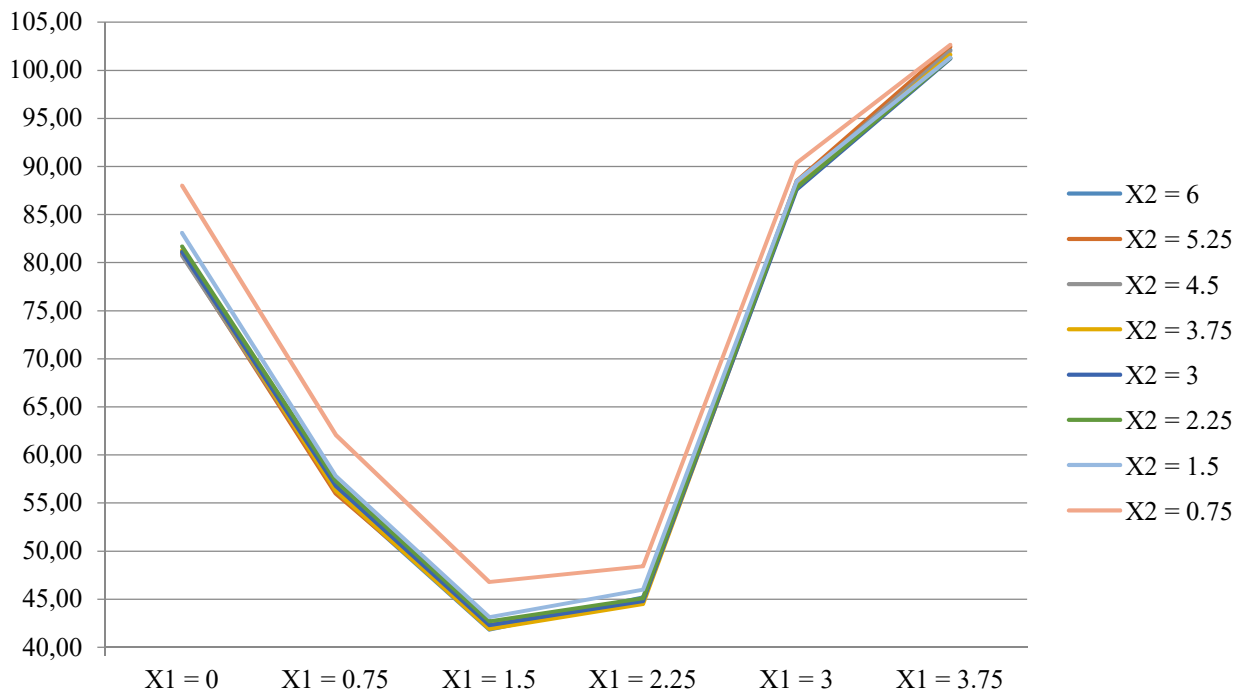


Рис. 16. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (прямоугольная труба, сталь С285, вылет 6 м), кг

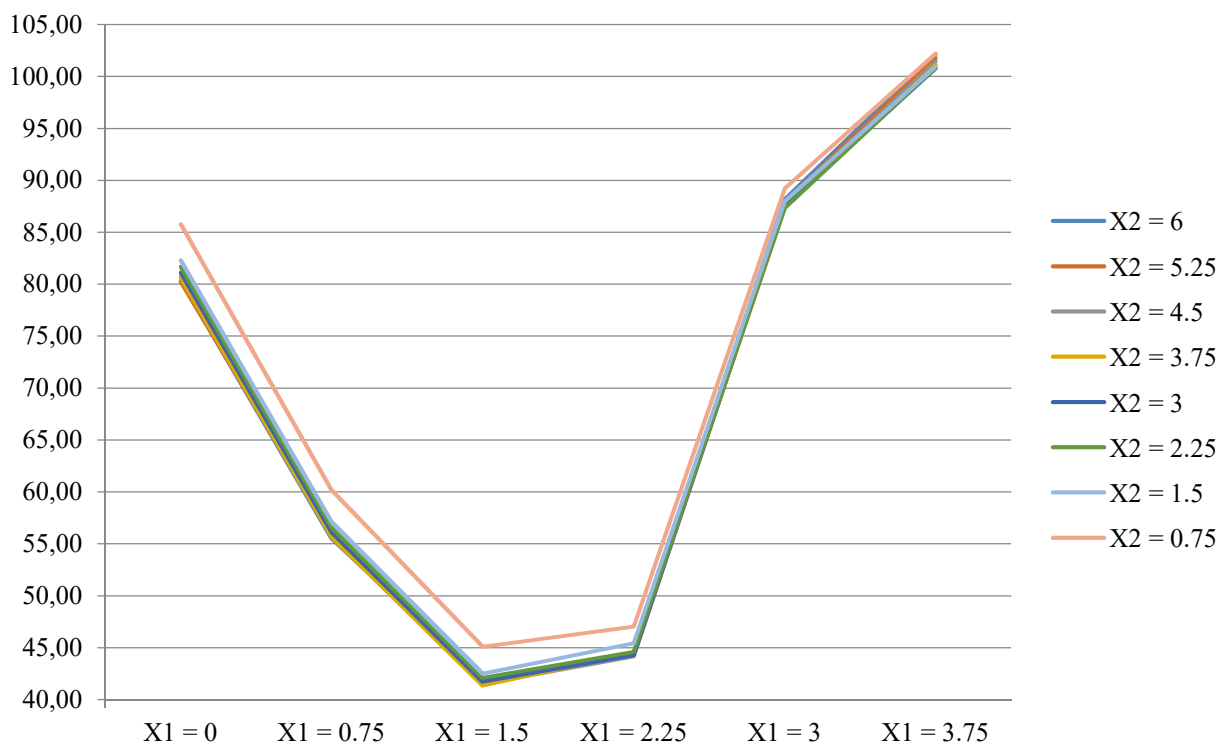


Рис. 17. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (прямоугольная труба, сталь С345, вылет 6 м), кг

*Круглая труба*, наряду с прямоугольной, является одним из наиболее оптимальных сечений. Несмотря на то, что, теоретически, при одинаковой массе и габаритах ее прочностные характеристики уступают таковым у прямоугольной трубы, при некоторых параметрах конструкции именно круглая труба оказывается наиболее оптимальным сечением. Вероятно, это вызвано частым шагом диаметров сечения и толщины стенки в принятом сортаменте. Так, в интервале диаметров сечения от 50 до 80 мм, который является актуальным при подборе сечения для конструкции вылетом 3 м, шаг диаметров составляет ~3 мм, а шаг толщины стенки 0,1...0,2 мм. В интервале диаметров от 110 до 130 мм шаг диаметров несколько больше – 6...13 мм, но шаг толщины стенки остается таким же малым – 0,2 мм. Это позволяет подобрать сечение с максимальным процентом использования несущей способности, и, следовательно, с минимальной металлоемкостью. Кроме этого, понижению металлоем-

кости способствует наличие в сортаменте тонкостенных сечений достаточно больших габаритов, которые обладают более высоким отношением несущей способности к массе, чем сечения с более толстыми стенками.

На рисунках 18-23 показана зависимость массы конструкции от ее геометрических характеристик при использовании круглой трубы. Изменение класса стали для круглой трубы, вероятно, является наиболее целесообразным. Так, при вылете 3 м увеличение класса стали позволяет значительно снизить металлоемкость и добиться практически полного использования несущей способности сечения. При вылете 6 м увеличение класса стали с С245 до С285 также снижает массу конструкции, но дальнейшее увеличение уже на нее не влияет, так как прогиб конструкции близок к предельному. Таким образом, можно сделать вывод, что при использовании круглой трубы повышение класса стали является целесообразным, так как позволяет снизить металлоемкость в большинстве расчетных случаев.

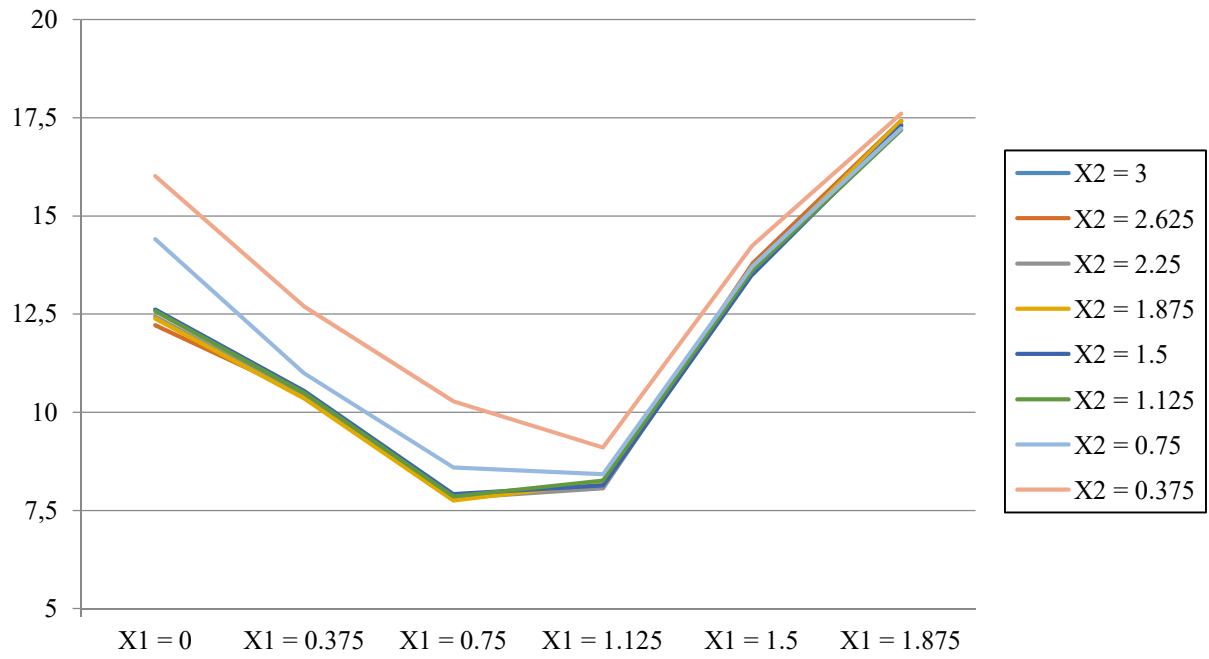


Рис. 18. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (круглая труба, сталь С245, вылет 3 м), кг

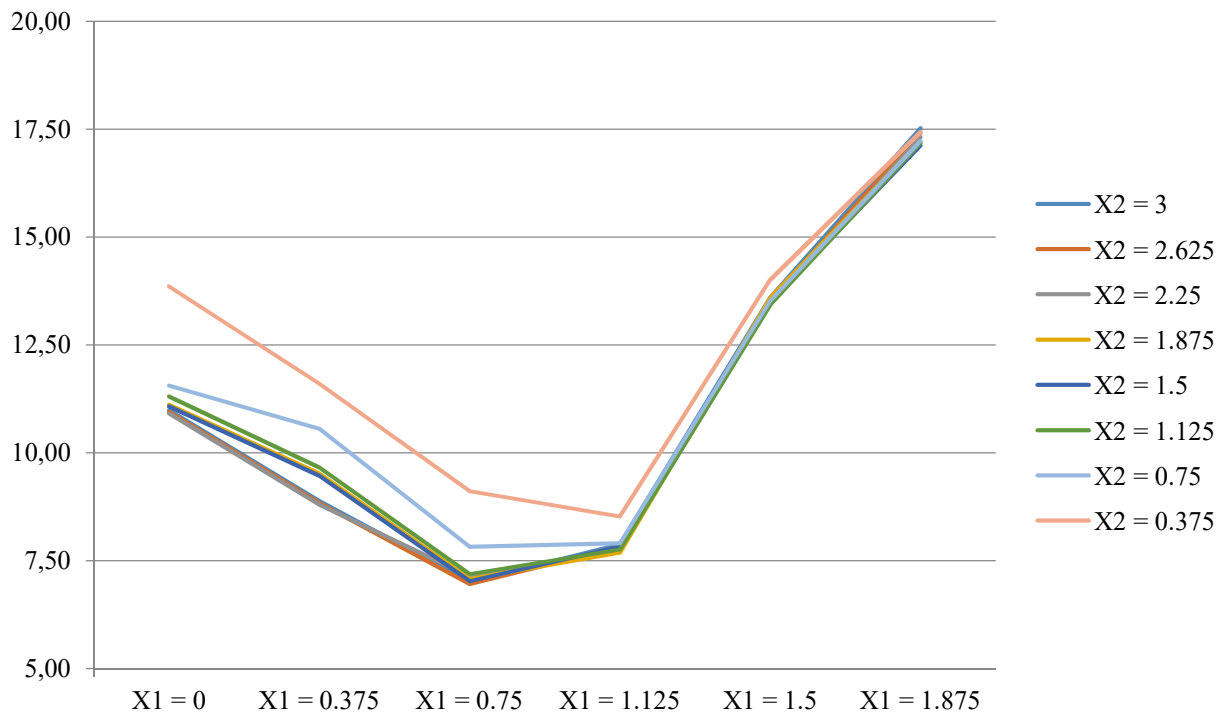


Рис. 19. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (круглая труба, сталь С285, вылет 3 м), кг

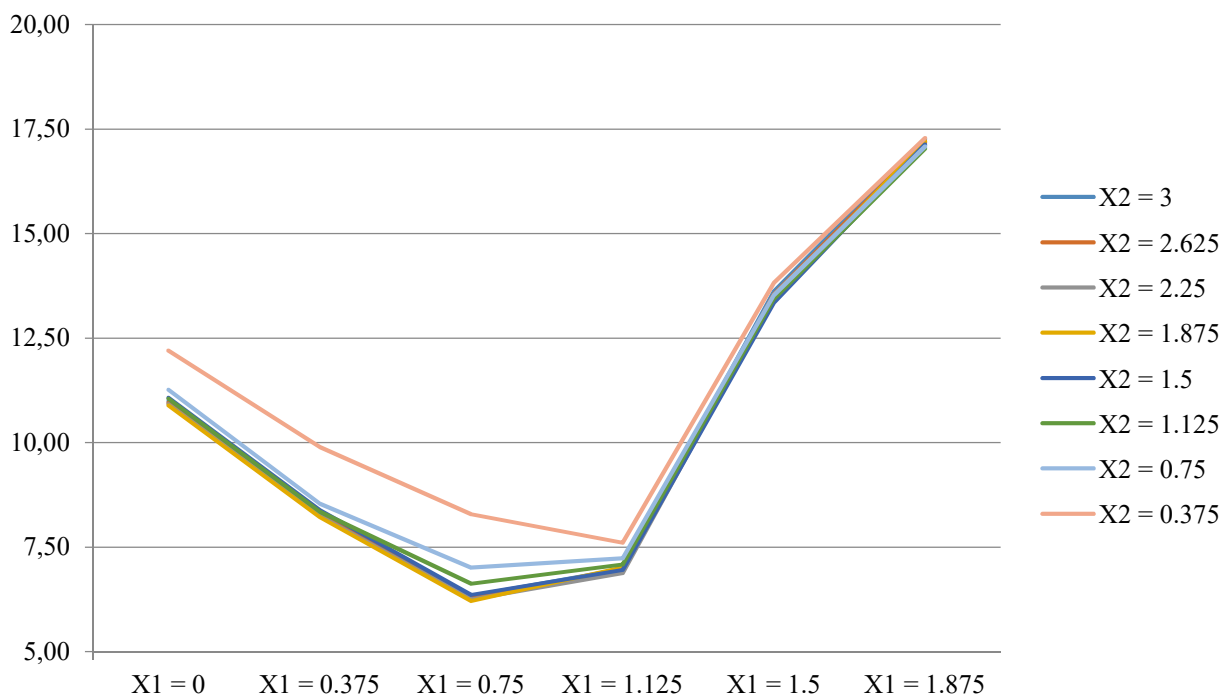


Рис. 20. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (круглая труба, сталь С345, вылет 3 м), кг

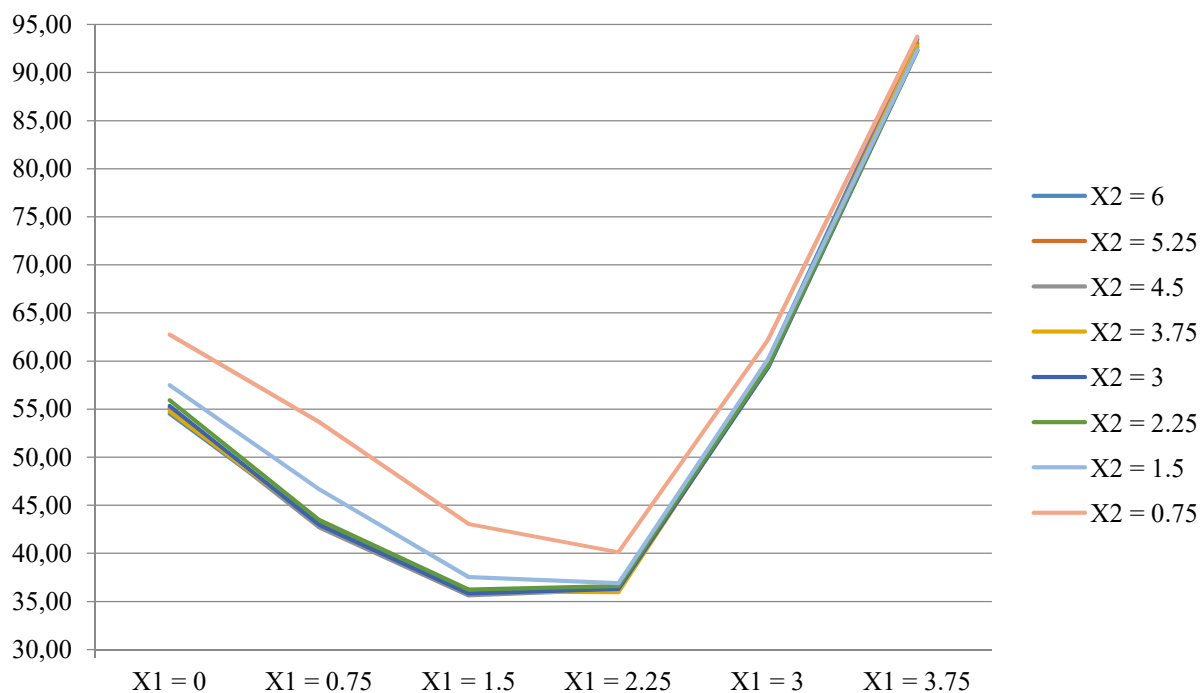


Рис. 21. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (круглая труба, сталь С245, вылет 6 м), кг

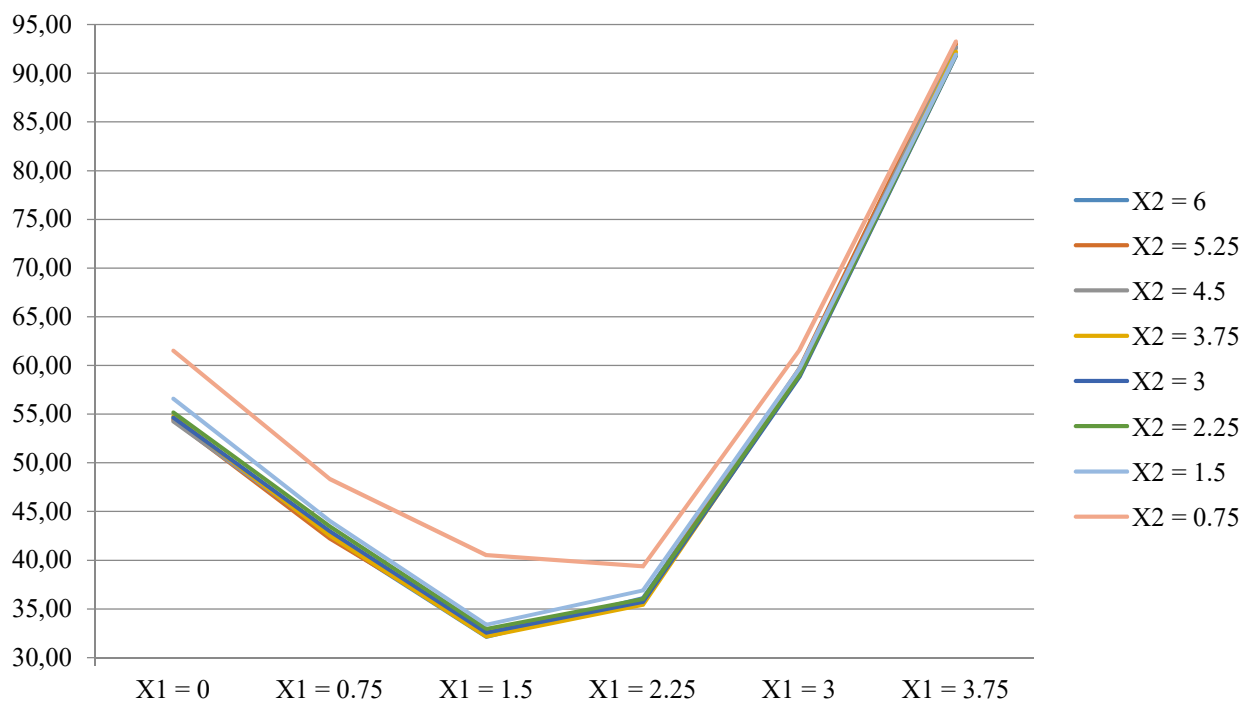


Рис. 22. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (круглая труба, сталь С285, вылет 6 м), кг

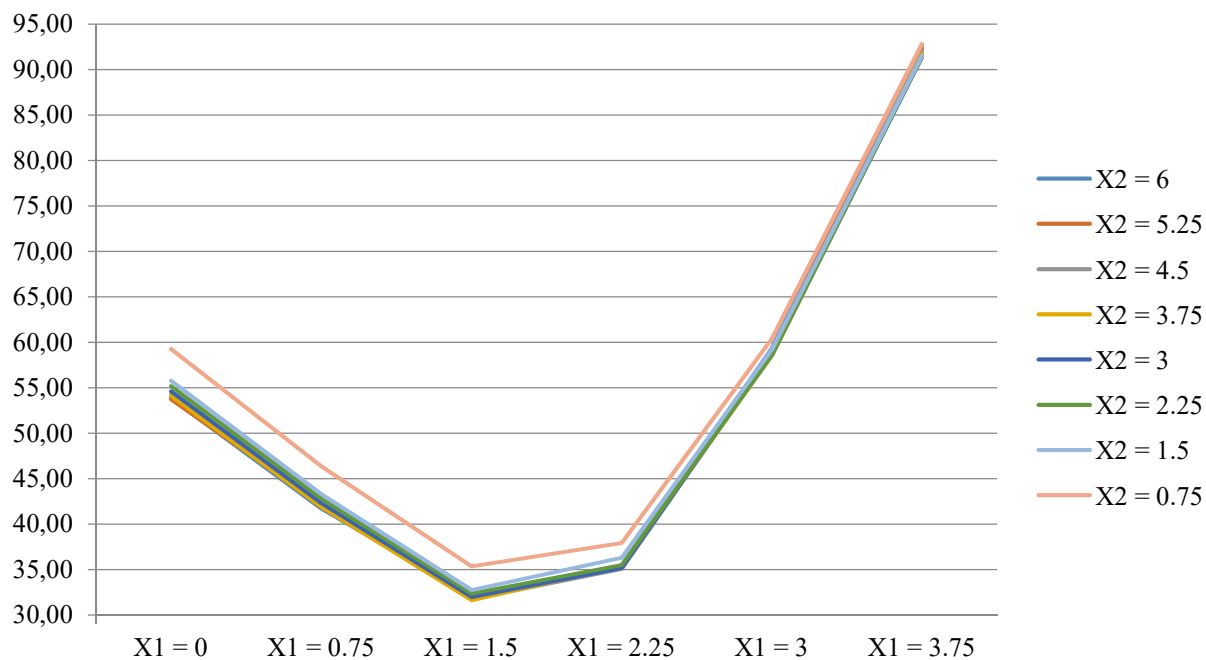


Рис. 23. Зависимость веса конструкции от геометрических параметров (круглая труба, сталь С345, вылет 6 м), кг

**Выводы.** Оптимальные геометрические параметры  $x_1$  и  $x_2$  для каждого сочетания сечения балки, класса стали и вылета представлены в таблице 5. Варианты конструкции с использованием швеллера и двутавра исключены из этой части

анализа, так как недонапряжение конструкции искажает результаты. Значения геометрических параметров в таблице даны в долях от вылета балки.

Таблица 5

## Значения оптимальных параметров

Сечение	Вылет, м	Класс стали	$X_{1\text{опт}}$	$X_{2\text{опт}}$
Квадратная профильная труба	3	C245	2/8	5/8
		C285	2/8	7/8
		C345	2/8	5/8
	6	C245	2/8	6/8
		C285	2/8	8/8
		C345	2/8	5/8
Прямоугольная профильная труба	3	C245	2/8	5/8
		C285	2/8	7/8
		C345	2/8	5/8
	6	C245	2/8	6/8
		C285	2/8	8/8
		C345	2/8	5/8
Круглая труба	3	C245	2/8	5/8
		C285	2/8	7/8
		C345	2/8	5/8
	6	C245	2/8	6/8
		C285	2/8	8/8
		C345	2/8	5/8

Как видно из таблицы, во всех случаях оптимальным значением  $X_1$  является  $X_1 = 2/8L$ . Такое значение обеспечивает оптимальное НДС конструкции, при котором металлоемкость конструкции является минимальной. При этом значение  $X_1$  значительно влияет на массу конструкции, как можно увидеть на приведенных выше графиках.

Оптимальное значение  $X_2$ , напротив, варьируется в зависимости от характеристик конструкции. Оптимальными являются значения  $5/8L \leq X_2 \leq 8/8L$ . При этом изменение  $X_2$  в этих пределах незначительно влияет на массу конструкции.

Подбор сечений элементов конструкции осуществлялся по условиям прочности и общей устойчивости. Ввиду того, что значительная часть подобранных сечений из круглой трубы и ЗГСП имеет толщину в пределах 2–3 мм, весьма вероятно потеря местной устойчивости этих элементов. Поэтому в будущем авторы планируют добавить в алгоритм подбора сечений также условие обеспечения местной устойчивости элементов, что позволит определить наиболее релевантные значения оптимальных размеров конструкции.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тамразян А.Г., Алексецев А.В. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. №1. С. 12–30. doi: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30.

2. Ахмадиев Ф.Г., Маланичев И.В. Популяционные алгоритмы структурно-параметрической оптимизации в строительном проектировании // Известия КГАСУ. 2018. № 2 (44). С. 215–223.

3. Бояршинова И.Н., Хусаинов В.С. Оптимальное проектирование конструкций с целью снижения веса // Научно-технический Вестник Поволжья. 2021. № 5. С.64–66.

4. Alpatov V. Search for the optimal shape of metal spatial (space) structures. IOP Conference series materials science and engineering. International science and technology conference on Fareastcon-2019, Vladivostok, 22-50 (2019). doi: 10.1088/1757-899X/753/2/022050.

5. Василькин А.А., Щербина С.В. Построение системы автоматизированного проектирования при оптимизации стальных стропильных ферм // Вестник МГСУ. 2015. №2. С. 21–37

6. Карпенко А.В. Современные проблемы параметрической оптимизации проектных решений в САПР // В сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2019. С. 3161–3166. DOI: 10.25728/vspu.2019.3166.

7. Туменова И.М. Параметрическая оптимизация трапециевидной деревянной фермы с восходящими раскосами на металлических зубчатых пластинах // Инженерный вестник Дона. 2017. №2(45). С. 131–142

8. Василькин А.А., Зубков Г.В. Металлоемкость структурной плиты покрытия при различных условиях опирания // ИВД. 2021. №2 (74). С. 180–191.

9. Ключев С. В., Ключев А. В., Лесовик Р. В. Оптимальное проектирование стальной пространственной фермы // Вестник ТГАСУ. 2008. №1. С. 74–79.

10. Василькин А.А. К интегрированию инструментов структурной оптимизации в САПР // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 9. С. 55–60.

11. Серпик И.Н., Тарасова Н.В. Оптимизация предварительно-напряженных стальных ферм с использованием эволюционного поиска // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. № 1 (282). С. 58–64.

12. Khomyak Y.U., Naumenko I.E., Zheglova V., Popov V. Minimizing the mass of a flat bottom of cylindrical apparatus // Eastern-European Journal

of Enterprise Technologies. 2018. №2/1 (92). С. 42–50. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126141.

13. Алпатов В.Ю. Пространственное светопрозрачное покрытие со стальным каркасом // В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. 2017. С. 44–47.

14. Brown N.C., Caitlin T. Mueller C.T. Automated performance-based design space simplification for parametric structural design // Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017 “Interfaces: architecture.engineering.science” 25 - 28th September, 2017, Hamburg.

15. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов. К.: Наук. думка, 1988. 736 с.

#### Информация об авторах

**Василькин Андрей Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций. E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

**Зубков Георгий Владиславович**, студент 6 курса института строительства и архитектуры. E-mail: gzonar363@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

Поступила 17.05.2022 г.

© Василькин А.А., Зубков Г.В., 2022

*\*Vasilkin A.A., Subkov G.V.*

*Moscow State University of Civil Engineering,*

*\*E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru*

## PARAMETRIC OPTIMIZATION OF THE CANOPY STRUCTURE BY NUMERICAL METHODS

**Abstract.** The article sets and solves the problem of finding the minimum weight of the canopy structure under the specified design scheme and loading conditions. At the same time, two variants of the design scheme are considered – with a canopy length of 3 and 6 m. The metal consumption of the structure is accepted as the criterion of optimality. The shape of the cross-section of the beam, the strength characteristics of the structural material and the geometric parameters of the structure are selected as variable parameters. The problem is solved by numerical method, for this purpose, by methods of structural mechanics, the forces in the structural elements, displacements and deflections of the beam and suspension are determined, then the obtained formal conditions of strength and stiffness are included in the algorithm on the basis of which a program is developed in one of the programming languages. In fact, the article solves the optimization problem according to the optimality criterion in the form of the cost of the structure, with limitations in the form of overall dimensions and conditions of strength and rigidity. This method will allow to quickly determine the stress of the structure, with a given design scheme, for any size, load and type of elements used. This approach can be considered as one of the applications of the BIM methodology, that is, to automate the process of designing a specific structure and can be used in practical work. It allows to significantly save time designing to find the optimal solution.

**Keywords:** parametric optimization, optimality criterion, load-bearing capacity, metal consumption.

### REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Alekseev A.V. Review of modern optimization methods for bearing systems of buildings and structures [Sovremennyye metody opti-

mizacii konstruktivnyh reshenij dlya nesushchih sistem zdaniy i sooruzhenij]. Vestnik MGSU. 2020. Vol. 15. No.1. Pp. 12–30. doi: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30. (rus)

2. Ahmadiev F.G., Malanichev I.V. Population-based algorithms of structural and parametric optimization in construction design. [Populyacionnye algoritmy strukturno-parametricheskoy optimizatsii v stroitel'nom proektirovanii]. News of the KGASU. 2018. No. 2 (44). Pp. 215–223. (rus)
3. Boyarshinova I.N., Husainov V.S. The optimal design of structures to reduce weight. [Optimal'noe proektirovanie konstrukcij s cel'yu snizheniya vesa]. Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2021. No. 5. Pp. 64–66. (rus)
4. Alpatov V. Search for the optimal shape of metal spatial (space) structures. IOP Conference series materials science and engineering. International science and technology conference on Fareastcon-2019, Vladivostok, 2019. 22–50 doi: 10.1088/1757-899X/753/2/022050. (rus)
5. Vasil'kin A.A., Shcherbina S.V. Development of a computer-aided design system for optimization of steel trusses [Postroenie sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya pri optimizatsii stal'nyh stropil'nyh ferm]. Vestnik MGSU. 2015. No. 2. Pp. 21–37. (rus)
6. Karpenko A.V. Modern problems of parametric optimization of design solutions in CAD systems [Sovremennye problemy parametricheskoy optimizatsii proektnykh reshenij v SAPR]. Article in the Proceedings of the XIII All-Russian Conference on Management Problems. Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences. 2019. Pp. 3161–3166. doi: 10.25728/vspu.2019.3166. (rus)
7. Tumenova I.M. Parametric optimization of a trapezoidal wooden truss with ascending braces on metal toothed plates. [Parametricheskaya optimizatsiya trapecievidnoj derevyannoj fermy s voskhodyashchimi raskosami na metallicheskih zubchatykh platinah]. Engineering journal of Don. 2017. No. 2 (45). Pp. 131–142. (rus)
8. Vasil'kin A.A., Zubkov G.V. Metal consumption of roofing space grid structures under various support conditions [Metalloemkost' strukturnoj plity pokrytiya pri razlichnykh usloviyah opiraniya]. Engineering journal of Don. 2021. No. 2 (74). Pp. 180–191. (rus)
9. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Lesovik R.V. optimal design of a steel spatial truss. [Optimal'noe proektirovanie stal'noj prostranstvennoj fermy]. Vestnik TGASU. 2008. No. 1. Pp. 74–79. (rus)
10. Vasil'kin A.A. Integration of tools of structural organization into CAD systems. [K integrirovaniyu instrumentov strukturnoj optimizatsii v SAPR]. Industrial and civil engineering. 2018. No. 9. Pp. 55–60. (rus)
11. Serpik I.N., Tarasova N.V. Optimization of pre-stressed steel trusses with the evolutionary search. [Optimizatsiya predvaritel'no-napryazhennykh stal'nykh ferm s ispol'zovaniem evolyucionnogo poiska]. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2019. No. 1 (282). Pp. 58–64. (rus)
12. Khomyak Y.U., Naumenko I.E., Zheglava V., Popov V. Minimizing the mass of a flat bottom of cylindrical apparatus. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. No. 2/1 (92). Pp. 42–50. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126141.
13. Alpatov V.Yu. Spatial light-transparent coating with a steel frame. [Prostranstvennoe svetoprozrachnoe pokrytie so stal'nym karkasom]. Article in the proceedings: Traditions and innovations in construction and architecture. Construction. 2017. Pp. 44–47. (rus)
14. Brown N.C., Caitlin T. Mueller C.T. Automated performance-based design space simplification for parametric structural design. Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017 “Interfaces: architecture.engineering.science” 25–28th September, 2017, Hamburg.
15. Pisarenko G.S. Handbook of Mechanics of Materials [Spravochnik po soprotivleniyu materialov]. Kiev: Naukova dumka, 1988. 736 p. (rus)

#### Information about the authors

**Vasilkin Andrei A.** PhD, associate professor Moscow State (National Research) University of Civil Engineering. E-mail: vasilkinaa@mgsu.ru. Yaroslavskoye Shosse 26, Moscow, Russian Federation, 129337.

**Zubkov Georgiy V.** Graduate student Moscow State (National Research) University of Civil Engineering. E-mail: gronar363@gmail.com. Yaroslavskoye Shosse 26, Moscow, Russian Federation, 129337.

Received 17.05.2022

#### Для цитирования:

Василькин А.А., Зубков Г.В. Параметрическая оптимизация конструкции навеса численными методами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 34–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-34-49

#### For citation:

Vasilkin A.A., Zubkov G.V. Parametric optimization of the canopy structure by numerical methods. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 9. Pp. 34–49. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-34-49