ENGINEER

international scientific journal

SPECIAL ISSUE

E-ISSN
3030-3893
ISSN
3060-5172

SLIB.UZ
Scientific library of Uzbekistan

A bridge between science and innovation

TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI
Tashkent state transport university

ENGINEER

A bridge between science and innovation

E-ISSN: 3030-3893

ISSN: 3060-5172

SPECIAL ISSUE

24-april, 2025

engineer.tstu.uz

MUHAMMADAMIN KABULOVICH TOHIROVNING TAVALLUDINING 80 YILLIGIGA BAG‘ISHLANGAN “SAMARALI QURILISH MATERIALLARI, KONSTRUKSIYALARI VA TEXNOLOGIYALARI” MAVZUSIDAGI XALQARO ILMIY-AMALIY KONFERENSIYASI ILMIY ISHLARI TO‘PLAMI

Toshkent davlat transport universiteti Rossiya Arxitektura va qurilish fanlari akademiyasining akademigi, O‘zbekiston Respublikasida xizmat ko‘rsatgan yoshlar murabbiysi, texnika fanlari doktori, professor **Muhammadamin Kabulovich Tohirovning tavalludining 80 yilligiga** bag‘ishlangan **“Samarali qurilish materiallari, konstruksiyalari va texnologiyalari”** mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya ilmiy ishlari to‘plami chop etildi.

Muhammadamin Kabulovich kompozitsion qurilish materiallarining polistrukturaviy nazariyasini rivojlantirishga ulkan hissa qo‘shgan olimdir. 1995-yilda Muhammadamin Kabulovich Rossiya Arxitektura va qurilish fanlari akademiyasining (RAASN) xorijiy a’zosi etib saylangan, bu esa ularning qurilish materialshunosligi sohasiga qo‘shgan ilmiy hissasining xalqaro miqyosdagi e’tirofi bo‘ldi. Ular o‘z ilmiy faoliyati davomida 6 ta monografiya, 200 dan ortiq ilmiy maqola va 25 ta ixtiroga mualliflik guvohnomasi yaratganlar.

Ushbu konferensiyaning asosiy maqsadi – qurilish materialshunosligi, bino va inshootlarni loyihalash hamda qurilish sohasidagi zamonaviy ilmiy tadqiqotlar natijalarini muhokama qilish, shuningdek, muhandislik ta’limini takomillashtirish yo‘llarini aniqlashdir.

Konferensiyada O‘zbekiston Respublikasi hamda xorijiy mamlakatlarning oliy o‘quv yurtlari va ilmiy-tadqiqot institutlari olimlari, shuningdek, muhim ilmiy tadqiqot natijalariga ega bo‘lgan ishlab chiqarish vakillari o‘z ilmiy ishlari bilan ishtirok etdilar.

“Samarali qurilish materiallari, konstruksiyalari va texnologiyalari” mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyaning asosiy yo‘nalishlari quyidagilardan iborat:

1. **Resurs va quvvatni tejaydigan qurilish materiallari va texnologiyalari** – zamonaviy ekologik va iqtisodiy talablarni qondirishga qaratilgan innovatsion yechimlar.
2. **Bino va inshootlarning qurilish konstruksiyalari, zamonaviy hisoblash va loyihalash usullari - muhandislik** va texnologik yechimlarni takomillashtirish yo‘nalishlari.
3. **Arxitektura va shaharsozlik** – estetik va funksional jihatlarni uyg‘unlashtirgan zamonaviy loyihalar yaratish.
4. **Zamonaviy muhandislik ta’limi tizimini takomillashtirish** – kelajak mutaxassislarini yuqori malakali darajada tayyorlash uchun ta’lim jarayonini modernizatsiya qilish.

Mazkur konferensiya ilmiy hamjamiyatning turli vakillarini bir joyga jamlab, qurilish materialshunosligi sohasidagi zamonaviy muammolar va istiqbollarni muhokama qilish uchun qulay platforma vazifasini bajardi.

Calculation of a steel prestressed truss with a span of 60 m, taking into account seismic impacts

G.S. Fridman[1][a], Sh.M. Turakulova[1][b]
[1]Samarkand State University of Architecture and Civil Engineering, Samarkand, Uzbekistan

Abstract: In this paper, calculations of a steel roof truss with prestressed puffs with a span of 60 m are presented. The calculations were performed in a geometrically nonlinear formulation in the LIRA CAD 2022 software package. The method of "engineering nonlinearity" was used to account for the vertical seismic load. It shows a significant increase in the rigidity of the truss and significant savings in steel due to the use of high-strength puffs.
Keywords: steel truss, tightening, prestressing, geometric nonlinearity, seismic load, engineering nonlinearity

Расчет стальной предварительно напряженной фермы пролетом 60 м с учетом сейсмических воздействий

Хальфин Г.Р.[1][a], Туракулова Ш.М.[1][b]
[1]Самаркандский государственный архитектурно-строительный университет, Самарканд, Узбекистан

Аннотация: В настоящей работе приводятся расчеты стальной стропильной фермы покрытия с предварительно напряженными затяжками пролетом 60 м. Расчеты выпол¬нены в геометрически нелинейной постановке в программном комплексе ЛИРА САПР 2022. Для учета вертикальной сейсмической нагрузки использован метод «инженерной нелинейности». Показано значительное повышение жесткости фермы и существенная эконо¬мия стали на нее за счет использования высокопрочных затяжек.
Ключевые слова: стальная ферма, затяжка, предварительное напряжение, геометрическая нелинейность, сейсмическая нагрузка, инженерная нелинейность

1. Введение

Предварительное напряжение в металлических конструкциях осуществляется с целью повышения их несущей способности и жесткости. Расход стали при этом снижается за счет применения затяжек из высокопрочных материалов (стальные канаты, пучки проволоки и др.) [1].

Компьютерное проектирование предварительно напряженных конструкций в ПК ЛИРА САПР имеет следующие особенности [2]:

1. Для моделирования предварительно напряженной затяжки используется геометрически нелинейный конечный элемент КЭ-308 (форкопф).
2. Расчет конструкций следует выполнять в геометрически нелинейной постановке, задавая вместо РСУ истории загружений.

В статье [3] показан детальный расчет фермы типа «арка с затяжкой» пролетом 36 м на статические нагрузки. В настоящей работе приводится аналогичный расчет фермы пролетом 60 м с выносной затяжкой при дополнительном учете вертикальной сейсмический нагрузки. При этом используется обоснованный в [4] метод «инженерной нелинейности», позволяющий использовать спектральный подход для определения сейсмических нагрузок в нелинейных задачах.

2. Методология исследования

Стропильная стальная ферма – это плоская стержневая конструкция покрытия здания. В данном случае исследуется ферма для покрытия большепролетного здания (60 м) гражданского или промышленного назначения. Для расчета такой фермы будем использовать конечно-элементное моделирование в программном комплексе ЛИРА САПР 2022. Для создания расчетной схемы, а также расчета и анализа результатов используем встроенные средства этой системы.

Ферма состоит из жесткой части с элементами из прокатных или гнутых профилей и двух выносных затяжек из высокопрочных стальных канатов. Жесткие элементы моделируются конечными элементами плоской рамы – КЭ-2. Моделирование затяжек осуществляется геометрически нелинейными конечными элементами для создания предварительного напряжения – КЭ-308 (форкопф).

Наличие нелинейных элементов в конструкции требует ее нелинейного расчета. Это означает использование шагово-итерационного метода расчета с заданием историй (последовательностей) загружения. При этом в варианте конструирования задается подбор сечений элементов по усилиям.

Основные нагрузки для такой фермы – это

[a] https://orcid.org/0009-0008-7327-1991
[b] https://orcid.org/0009-0006-4557-1319

собственный вес покрытия и снег. Кроме того, для фермы такого пролета обязателен учет вертикальной сейсмической нагрузки. Дополнительная нагрузка от предварительного напряжения затяжек создается на стадии монтажа конструкции с целью повышения ее жесткости и снижения металлоемкости.

В соответствии с методом инженерной нелинейности расчет конструкции произведем в два этапа:

1. Линейный расчет фермы без затяжек на статические и сейсмические нагрузки; это необходимо для первоначального подбора сечений, а также определения динамических характеристик конструкции.
2. Нелинейный расчет предварительно напряженной фермы с затяжками на нагрузки как в стадии монтажа, так и в стадии эксплуатации. При этом используется квазистатическое загружение мнерционными сейсмическими нагрузками, найденными в п.1. Далее можно определить эффект от предварительного напряжения затяжек.

2.1. Исходные данные задачи

Стропильная ферма прямоугольного очертания имеет пролет 60 м; шаг ферм – 6 м. Высота фермы составляет 5 м (L/12) при длине панели верхнего пояса 3 м, решетка фермы – шпренгельная.

Сечения стержней жесткой части фермы приняты из замкнутых гнутосварных профилей (ГСП), материал этой части фермы – сталь класса С255. Затяжки выполнены из каната марки ЛК-З 6х25(1+6, 6+12)+7х7(1+6); диаметр каната предварительно примем равным 42 мм.

Постоянная нагрузка принята от утепленной кровли на основе стального профилированного настила и собственного веса металлоконструкций. Кроме того, на нижние пояса опираются коммуникации и конструкции подвесного потолка – эту нагрузку будем считать равномерно-распределенной. Район строительства – г. Самарканд.

2.2. Определение нагрузок, действующих на ферму

Постоянная нагрузка. Расчетную нагрузку от веса покрытия (включая вес ферм со связями) примем равной q_n = 1,5 кН/м^2. Узловые нагрузки на средние и крайние узлы верхнего пояса равны:

$P_{пк1} = q_n \cdot B \cdot d = 1{,}5 \cdot 6 \cdot 3 = 27$ кН; $P_{пк2} = P_{п1}/2 = 13{,}5$ кН.

Здесь B – шаг ферм, d – длина панели верхнего пояса.

Расчетная нагрузка от подвесного потолка и коммуникаций равна 0,8 кН/м^2. Тогда нагрузки на узлы нижнего пояса будут равны:

$P_{пп} = 0{,}8 \cdot 6 \cdot 6 = 28{,}8$ кН/м.

Снеговая нагрузка. Нормативная нагрузка для г. Самарканда равна 0,5 кН/м^2, расчетная нагрузка 0,5·1,4= 0,7 кН/м^2. Узловые нагрузки на средние и крайние узлы верхнего пояса равны:

$P_{сн1} = 0{,}7 \cdot 6 \cdot 3 = 12{,}6$ кН; $P_{сн2} = P_{сн1}/2 = 6{,}3$ кН.

Сейсмическая нагрузка.

При определении вертикальных узловых масс постоянная нагрузка принимается с коэффициентом 0,9, а снеговая нагрузка – с коэффициентом 0,5.

Для средних и крайних узлов верхнего пояса будем иметь:

$P_{смв1} = 0{,}9 \cdot P_{пк1} + 0{,}5 \cdot P_{сн1} = 0{,}9 \cdot 27 + 0{,}5 \cdot 12{,}6 = 30{,}6$ кН;

$P_{смв2} = P_{смв1}/2 = 15{,}3$ кН.

Для узлов нижнего пояса будем иметь:

$P_{смн1} = 0{,}9 \cdot P_{пп} = 0{,}9 \cdot 28{,}8 = 25{,}92$ кН.

Нагрузка от предварительного напряжения затяжек учитывается дополнительно в отдельном загружении.

3. Расчет и анализ результатов

3.1. Расчет фермы без предварительного напряжения

По аналогии с [3] в приложении ПК ЛИРА САПР создадим файл задачи, приняв для него 2-0й признак системы (плоская рама). Далее введем расчетную схему фермы, принимая для всех стежней тип конечного элемента КЭ-2 (рисунок 1). Полученная схема показана на рисунке 1.

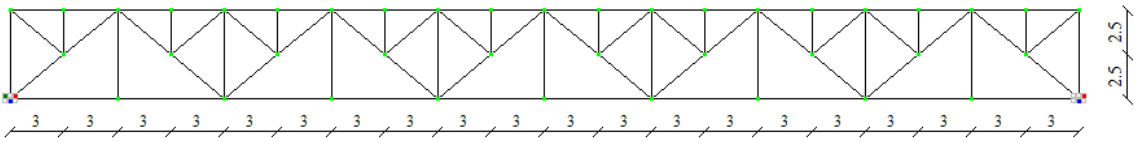

Рис. 1. Схема фермы пролетом 60 м

Далее введем типы жесткости стержней и параметры конструирования. Будем считать, что все узлы фермы закреплены из ее плоскости связями покрытия. Указанные параметры для левой половины показаны на рисунке 2.

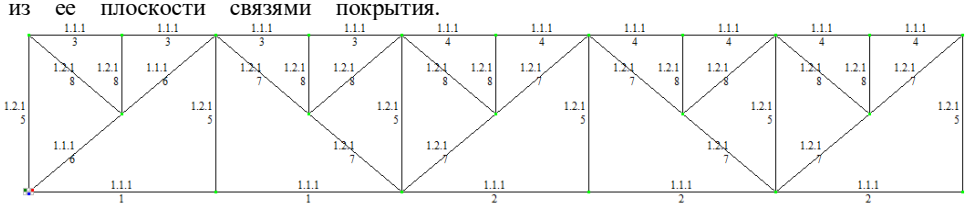

Рис. 2. Типы жесткости стержней и параметры конструирования

Введем узловые нагрузки загружения 1 (постоянная нагрузка), загружения 2 (снеговая нагрузка), и загружения 3 (сейсмическая нагрузка). Зададим параметры РСУ для основных и особых сочетаний нагрузкок, а для загружения 3 – параметры динамического загружения для 8-балльной зоны г. Самарканда. Зададим также предельные неупругие деформации равными 10.

Выполним расчет, заменим принятые сечения стержней на подобранные, и повторим расчет. Окончательные результаты подбора сечений приведены на рисунке 3 (сечения полностью совпадают).

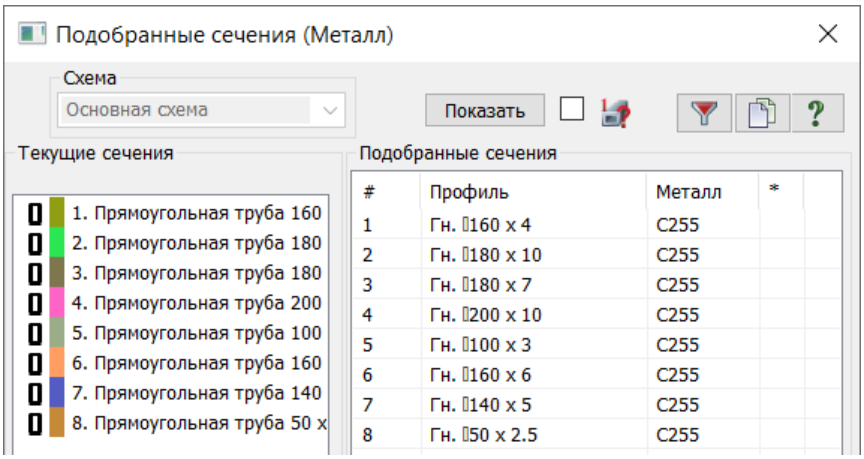

Рис. 3. Принятые и подобранные сечения стержней

По результатам расчета значимыми оказались три формы собственных колебаний конструкции – 1,3,5. В качестве иллюстрации на рисунке 4 приведена деформированная схема фермы от 3-й формы колебаний.

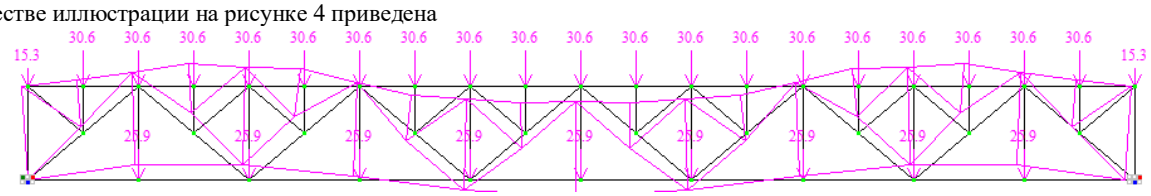

Рис. 4. Деформированная схема фермы от динамического загружения (форма 3)

Динамические характеристики конструкции (периоды собственных колебаний и модальные массы) приведены в таблице 1. Суммарная модальная масса составляет 96,1%, что означает достаточную точность расчетов.

Таблица 1

№ загруж.	№ формы	Период сек	Модальная масса, %
3	1	0,768	83,630
3	3	0,162	7,309
3	5	0,089	5,164
		Итого:	96,104

Для расчета предварительно напряженной фермы в соответствии с методом инженерной нелинейности понадобятся статические инерционные воздействия от сейсмического загружения. Результирующие инерционные нагрузки определяют по формуле:

$$S_p = \sqrt{\sum S_i^2},$$

где S_i – инерционная нагрузка в узле от i-той формы колебаний.

Таблица 2

Нагрузки для верхних узлов

№ узла	Инерционные нагрузки, кН			
	S_1	S_2	S_3	S_p
2	0,002	-0,036	-0,641	0,64
4	-1,568	-1,638	-6,759	7,13
6	-3,366	-3,229	-3,875	6,06
8	-5,141	-5,379	-1,429	7,58
10	-6,254	-4,705	1,309	7,94
12	-7,350	-4,169	4,328	9,49
14	-8,360	-0,950	2,398	8,75
16	-9,383	2,059	1,234	9,68
18	-9,826	3,024	-0,481	10,29
20	-10,228	4,015	-2,314	11,23
22	-10,221	3,677	-1,927	11,03

Для верхних узлов левой половины фермы инерционные нагрузки приведены в таблице 2 (вычисления выполнены в программе Microsoft Excel).

Аналогично найдем значения инерционных нагрузок для нижних узлов (таблица 3).

Таблица 3

Нагрузки для нижних узлов

№ узла	Инерционные нагрузки, кН			
	S_1	S_2	S_3	S_p
5	-2,859	-2,977	-4,524	6,124
9	-5,253	-3,210	0,346	6,166
13	-7,106	-0,875	2,794	7,686
17	-8,253	2,065	-0,120	8,508
21	-8,689	3,390	-2,248	9,594

Теоретическую массу фермы получим, суммируя нагрузку от ее собственного веса в ЛИРА САПР. В данном случае она равна 7765 кг.

Проверим прогиб фермы от загружений 1, 2 и 3 (форма 1):

f = 17,30+5,26+4,91=27,47 см > [f] = L/400=60·100/400 = 15 см.

Проверка не выполняется, так что жесткость фермы недостаточна. Но окончательный вывод о жесткости сделаем после расчета предварительно напряженной фермы.

3.2. Расчет предварительно напряженной фермы

За основу возьмем файл предыдущей задачи, сохраним его под другим именем. Введем дополнительные стержни: опорную стойку длиной 2,5 м и две симметричные затяжки, зададим для них сечения, введем параметры конструирования. Заменим тип конечного элемента затяжек на КЭ-308.

Схема фермы с затяжками показана на рисунке 5.

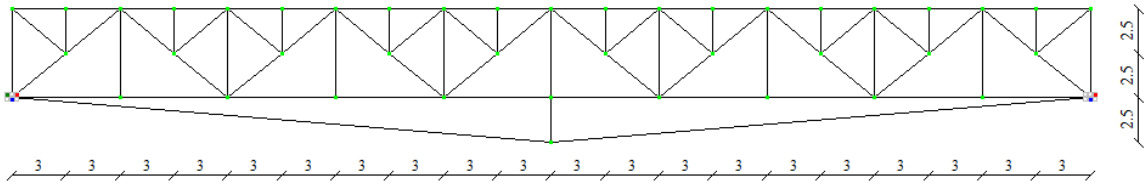

Рис. 5. Схема фермы с затяжкой

В данном случае целесообразно производить предварительное напряжение затяжек после приложения постоянной нагрузки. В противном случае в стержнях нижнего пояса возникнут сжимающие усилия, которые при больших расчетных длинах приведут к существенному увеличению сечений.

Поэтому примем следующую последовательность загружений:

1.Постоянная нагрузка;
2.Предварительное напряжение затяжек;
3.Снеговая нагрузка;
4.Сейсмическая инерционная нагрузка.

Для имитации особого сочетания нагрузок умножим нагрузки загружения 1 на коэффициент сочетаний 0,9, а нагрузки загружения 3 – на коэффициент 0,5. Величину предварительного напряжения затяжек примем равной 500 кН. Создадим загружение 4 и введем для него статические инерционные нагрузки нагрузки из таблиц 2 и 3.

Для учета нелинейной работы конструкции удалим таблицу РСУ и введем таблицу моделирования нелинейных загружений: история 1 – загружения 1 и 2 (стадия стадия монтажа) и история 2 – загружения 1, 2, 3 и 4 (стадия эксплуатации). В варианте конструирования введем подбор сечений по усилиям.

Выполним расчет, заменим принятые сечения элементов на подобранные, и повторим расчет. Окончательные результаты подбора сечений приведены на рисунке 6 (здесь видно полное совпадение сечений стержней).

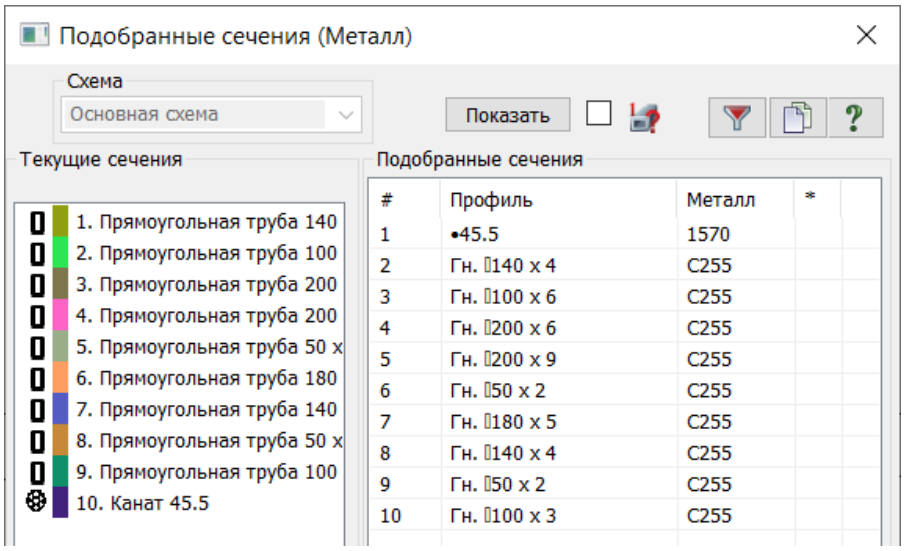

Рис. 6. Принятые и подобранные сечения стержней

Проверим прогиб фермы от основной истории 2:

$$f = 18{,}84 \text{ см} > [f] = 15 \text{ см}.$$

Проверка не выполняется, но превышение прогиба небольшое, и при замене расчетных нагрузок на нормативные проверка будет выполнена. Отметим также, что уменьшение прогиба за счет обратного выгиба от предварительного напряжения затяжек составило 31,4%.

Масса фермы составляет 2556 кг, экономия стали по сравнению с фермой без затяжек равна 28,2%.

4. Заключение

Приведен расчет большепролетной стальной фермы с предварительно напряженными затяжками в программном комплексе ЛИРА САПР 2022. Для одновоеменного учета геометрической нелинейности и вертикальной сейсмической нагрузки использован метод инженерной нелинейности.

Показано, что предварительное напряжение фермы высокопрочными затяжками приводит к снижению расхода стали на 28% и повышению жесткости конструкции на 31%.

Использованная литература / References

[1] Металлические конструкции: Специальный курс. / Под ред. Е.И. Беленя. – М., Стройиздат, 1991. – 687 с.

[2] Стрелец–Стрелецкий Е.Б., Журавлев А.В., Водопьянов Р.Ю. «ЛИРА САПР. Книга I. Основы» / Под ред. акад. РААСН, проф. А.С. Городец¬кого. – Издательство LIRA LAND, 2019. – 154 с.

[3] Фридман Г.С., Туракулова Ш.М. «Стальная ферма, предварительно напряженная затяжкой» / II-Respublika ko‘rik tanlovi hamda talabalarning ilmiy-amaliy konferensiyasini. Jizzax politexnika instituti, 20 may, 2023. – 6 с.

[4] Фридман Г.С., Туракулова Ш.М. «Расчет решетчатых изгибно-жестких вант на сейсмическую

нагрузку» / «Qurilishda innovatsion texnologiyalar» xalqaro ilmiy-texnik anjuman. Toshkent arxitektura-qurilish universiteti, 20 may, 2023. – 8 с.

Информация об авторах/ Information about the authors

Фридман Геннадий Соломонович Канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительная инженерия» Самаркандского государственного архитектурно-строительного университета,
e-mail: gennadiyfridman47@gmail.com
Tel.: +99890 7423165
https://orcid.org/0009-0008-7327-1991

Туракулова Шахноза Маруфовна Докторант кафедры «Строительная инженерия» Самаркандского государственного архитектурно-строительного университета,
e-mail: shakhnoza/turakulova@gmail.com
Tel.: +99891 3130500
https://orcid.org/0009-0006-4557-1319

CONTEXT / MUNDARIJA

B. Kodirov, S. Shaumarov, S. Kandakhorov
Evaluation of spatial-structural properties and thermal technical indicators of autoclave-free aerated concrete produced from industrial waste……..**112**

B. Kodirov, S. Shaumarov, S. Kandakhorov
Analysis of technological properties of heat-insulating aerated concrete……..**118**

2 section. Building structures of buildings and constructions, modern methods of calculation and design

L. Bocharova, K. Muhammadsoliyev
Study of the efficiency of using thin-walled structures in industrial building covering ……..**123**

A. Kholmurodov
Effective steel structures for industrial buildings……..**127**

Kh. Akramov, J. Tokhirov, H. Samadov
Experimental investigation of load-bearing capacity of three-layer panels with insolation layer based on rice crete……..**131**

A. Abdusattarov
Models of deformation of main pipelines under repeated-variable loading considering material damageability……..**135**

G. Fridman, Sh. Turakulova
Calculation of a steel prestressed truss with a span of 60 m, taking into account seismic impacts……..**139**

Kh. Umarov, Yu. Tursinaliyeva
Geotechnical risk assessment and monitoring of the railway tunnel on the Angren - Pop section……..**144**

N. Khudayberdiyev, S. Khudaykulov
Calculations of seismic loads of the Rezaksai Reservoir……..**148**

S. Razzakov, D. Berdakov
Calculation of joints of bending wooden structural elements in ANSYS Workbench……..**152**

A. Abdujabarov, P. Begmatov, G. Khalfin
The use of armogrunt structures to strengthen the railway roadbed……..**157**