СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ. ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЖКК. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЯ

УДК 69.07

DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.9

Влияние температуры на напряженно-деформированное состояние воздушных связей

И.О. Махов

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

АННОТАЦИЯ

Введение. В зданиях-памятниках перекрытия и покрытия выполняются в виде сводов и арочных систем. Для восприятия распоров сводов используются воздушные связи. Воздушные связи представляют собой затяжку, выполненную из сварочного железа с площадью поперечного сечения от 10 до 50 см². В научно-технической литературе информация о воздушных связях крайне ограничена.

Материалы и методы. Для оценки влияния температурных деформаций на несущую способность воздушных связей проведен расчетный анализ. На основании информации по типовым конструктивным схемам зданий-памятников, в расчет была принята характерная длина воздушных связей. Проанализированы усредненные климатические данные, рассчитанные на основе метеонаблюдений за период 1988–2017 гг. для 13 климатических областей России. Учитывая невозможность определения температуры замыкания распорной системы, рассмотрено два варианта уличной температуры при монтаже воздушных связей: нулевая температура и максимальная температура за летний период года.

Результаты. Проведены расчеты и определены напряжения, возникающие в воздушных связях при соответствующих температурных удлинениях полученных с учетом различных температур замыкания системы. Всего получено и проанализировано 78 температурных графиков для различных климатических областей, с различными температурами замыкания распорной системы.

Выводы. Установлено, что при оценке влияния температурных деформаций на несущую способность воздушных связей определяющей является фактическая температура замыкания связевой системы свода. Запас несущей способности воздушных связей для большинства климатических зон превышает 50 %, и может достигать 92 %. При этом для двух областей со значительными минусовыми температурами зимнего периода коэффициент использования связей может достигать 0,6–0,63. Максимальное температурное удлинение воздушных связей длиной 6 м не превышает 3 мм в случае монтажа воздушной связи при максимальной температуре летнего периода, и 2 мм — при нулевой температуре.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: воздушные связи распорных систем, усилия в воздушных связях, здание-памятник, сводчатые конструкции, металлические конструкции, реконструкция, температурные деформации

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Махов И.О. Влияние температуры на напряженно-деформированное состояние воздушных связей // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.9

Impacts of temperature on the stress-strain state of aerial braces of arch systems

Igor O. Makhov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavskoe shosse, 129337, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In landmark buildings, floorings and roofs are performed as vault and arch systems. For accommodation of horizontal forces in the arches, aerial braces are used. Aerial braces of an arch system are a tie made of wrought iron with a cross-sectional area from 10 to 50 cm². In the scientific and technical literature, information on aerial braces is extremely poor.

Materials and methods. To assess the impacts of temperature deformations on the bearing strength of the aerial braces, a computational analysis was performed. On the basis of data on standard structural schemes of the landmark buildings, the characteristic length of aerial braces was taken into account. Averaged climatic data calculated on the basis of weather observations for the period 1988–2017 for 13 climatic regions of Russia were analysed. Since the data on the temperature of the closure of the distance piece system are irrevocably missing, two variants of the outdoor temperature were considered for the installation of the aerial braces: zero and the maximum summer temperature.

Results. Calculations were carried out and the strain arising in the aerial braces at the corresponding temperature elongation values obtained under recognition of the different temperatures of arch system closure was determined. Totally 78 temperature graphs were obtained and analysed for different climate areas, with different closure temperatures of arched systems.

Conclusions. It was found out that, for the assessment of the impacts of temperature deformation on the bearing capacity of aerial braces, the actual temperature of the arch system closure is decisive. The safety factor of the bearing strength of aerial braces of arch systems for most climatic zones exceeds 50 % and can reach 92 %. At the same time, for two areas with significant negative temperatures in the winter period, the utilization ratio of aerial braces can reach 0.6–0.63. The maximum temperature elongation of aerial braces with a length of 6 m does not exceed 3 mm in case of mounting at the maximum summer temperature and 2 mm at the zero point.

KEYWORDS: aerial braces of arch systems, force in aerial braces of arch systems, landmark building, vault structures, metal structures, reconstruction, temperature deformation impacts

FOR CITATION: Makhov I.O. Impacts of temperature on the stress-strain state of aerial braces of arch systems. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2019; 9(2):9. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.9 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Сводчатые конструкции — распространенный способ устройства перекрытий и покрытий в зданиях-памятниках русской гражданской и культовой архитектуры, начиная с X в. [1]. Для восприятия распоров сводчатых конструкций использовались системы арок, аркбутаны, контрфорсы и воздушные связи. Конструктивно воздушные связи выполнялись в виде затяжек. Связи могли располагаться в различных уровнях по высоте свода, при этом наиболее распространенным следует считать расположение воздушных связей в уровне пят сводов.

Воздушные связи являются элементом конструкции, воспринимающим распор свода. Они изготавливались из сварочного железа различного сечения. Наиболее распространенными следует считать связи прямоугольного сечения, с площадью сечения от 10 до 50 см² [2]. Связи это элемент без сты-

ковых узлов в пролете, проходящие в поперечном сечении свода, выполненные в виде единого бруска или нескольких пластин. Анкеровка связи может быть как внутренней, так и наружной, через шпилит.

Действительная работа воздушных связей на сегодняшний день мало изучена, в частности вовсе не изучен вопрос о температурных деформациях, возникающих в воздушных связях. Наиболее полно сведения о работе воздушных связей представлены в трудах Н.К. Лахтина [3] и Г.Б. Бессонова [4, 5].

Актуальным вопрос действительной работы воздушных связей следует считать в связи со значительным количеством реставрационных и реконструкционных работ, проводимых в зданиях-памятниках в нашей стране и за рубежом. На сегодняшний день осуществляются научно-исследовательские работы, связанные с изучением действительной работы сводчатых конструкций памятников архитектуры [6–8]. Разрабатываются

методики по оценке влияния инженерно-геологических условий, в том числе сейсмичности, на несущую способность сводов [9–11], а также оценке несущей способности сводчатых систем в режиме реального времени [12, 13] и воссозданию сводчатых структур [14]. При этом несущая способность сводчатых систем зачастую напрямую зависит от наличия, технического состояния и включенности в работу воздушных связей, что подтверждается натурными и теоретическими работами [15, 16].

В настоящее время проведен ряд исследований по действительной работе воздушных связей, в частности по определению материалов связей [17] и их геометрических характеристик [2, 13], предложены методы усиления воздушных связей [18–21]. При этом вопрос усилий, возникающих в воздушных связях, является одним из ключевых, в частности вопрос температурных воздействий. Согласно публикации [4] до 70 % несущей способности воздушных связей расходуется на сопротивление температурным деформациям, что практически исключает связи из работы сводчатых конструкций. В свою очередь натурные и теоретические исследования показывают необеспеченность несущей способности сводов при отсутствии или утрате связей. Таким образом, цель данной работы — определение влияния температуры на напряженно-деформированное состояние воздушных связей. Уточнение усилий, возникающих от температурных воздействий, в дальнейшем позволит скорректировать методы усиления воздушных связей, предложенные автором ранее [21].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки влияния температурных деформаций на несущую способность воздушных связей был проведен расчетный анализ. На основании информации по типовым конструктивным схемам зданий-памятников [2], в расчет была принята характерная длина воздушных связей равная 6 м, соответствующая типовому пролету сводчатых конструкций. В соответствии с данными научно-технической литературы и лабораторными испытаниями образцов [17] значения пределов прочности материала воздушных связей могут варьироваться в диапазоне от 160 до 450 МПа.

Проанализированы усредненные климатические данные, рассчитанные на основе метеонаблюдений за период 1988–2017 гг. для 13 климатических областей России. В каждой области за расчетную точку принимался один из наиболее крупных населенных пунктов.

Учитывая невозможность определения температуры замыкания распорной системы, было рассмотрено два варианта уличной температуры при монтаже воздушных связей. Варианты температуры замыкания предполагались исходя из возмож-

ностей проведения строительно-монтажных работ в X–XVII вв. В первом случае за момент монтажа воздушных связей принималась нулевая температура, что предположительно могло соответствовать возобновлению строительных работ после зимнего перерыва, и показывает напряжения от температурных колебаний летнего и зимнего периодов, соответственно. Второй случай — максимальная температура за летний период года, обеспечивающая максимальные температурные напряжения в зимний период года. Для всех климатических областей рассматривались средние, максимальные и минимальные температуры за наблюдаемый период.

Были проведены расчеты и определены напряжения, возникающие в воздушных связях при соответствующих температурных удлинениях полученных с учетом различных температур замыкания системы. Всего получено и проанализировано 78 температурных графиков для различных климатических областей, с различными температурами замыкания распорной системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам проведенных работ были выявлены максимальные температурные деформации в воздушных связях при воздействии средних, максимальных и минимальных температур, в случае монтажа связи при нулевой температуре (табл. 1) и при максимальной температуре летнего периода (табл. 2).

Для большинства климатических областей удлинение не превышает 3 мм в случае монтажа воздушной связи при максимальной температуре летнего периода. В случае монтажа воздушной связи при нулевой температуре максимальное удлинение равно 2,8 мм, а в среднем не превышает 2 мм.

По результатам анализа массивов данных были получены гистограммы отражающие изменения напряжений в воздушных связях в течение года для различных климатических областей. В качестве примера на рис. 1–6 представлены гистограммы характерных климатических областей с наименьшими, средними и наибольшими среднегодовыми температурами.

По результатам анализа полученных гистограмм были определены максимальные напряжения в воздушных связях, а также выявлено процентное соотношение от расчетного сопротивления материала связей (табл. 3, 4).

Анализ выполненных расчетов показывает, что напряжения в связях от температурных воздействий варьируется в диапазоне от 8,3 до 44,1 % от расчетного сопротивления материала связей, при нулевой температуре замыкания системы; и от 8,7 до 62,5 % — при максимальной температуре летнего периода. При этом в среднем температурные напряжения составляют 33–45 %.

Табл. 1. Максимальные температурные деформации в воздушных связях в случае монтажа при нулевой температуре

№ п/п	Номер климатической области	Наименования города	Максимальные температурные деформации, мм		
			Максимальная температура	Минимальная температура	Средняя температура
1	5	Мурманск	1,46	1,47	1,11
2	6	Норильск	2,25	2,81	2,46
3	7	Анадырь	1,62	2,20	1,91
4	8	Архангельск	1,71	1,41	1,36
5	9	Москва	1,95	1,20	1,57
6	10	Томск	1,97	1,77	1,52
7	11	Иркутск	1,93	1,96	1,50
8	12	Владивосток	1,97	1,55	1,63
9	13	Магадан	1,52	2,12	1,67
10	14	Сочи	2,17	1,56	1,86
11	15	Челябинск	2,10	1,79	1,68
12	16	Астрахань	2,56	1,56	2,05
13	20	Кызыл	2,20	2,60	2,25

Табл. 2. Максимальные температурные деформации в воздушных связях в случае монтажа при максимальной температуре летнего периода

№ п/п	Номер климатической области	Наименования города	Максимальные температурные деформации, мм		
			Максимальная температура	Минимальная температура	Средняя температура
1	5	Мурманск	2,14	2,20	2,17
2	6	Норильск	3,84	3,69	3,73
3	7	Анадырь	2,93	2,97	2,93
4	8	Архангельск	2,52	2,32	2,42
5	9	Москва	2,41	2,08	2,21
6	10	Томск	3,14	2,83	2,94
7	11	Иркутск	3,05	2,92	2,95
8	12	Владивосток	2,74	2,92	2,73
9	13	Магадан	2,73	2,87	2,72
10	14	Сочи	1,57	1,49	1,53
11	15	Челябинск	3,15	3,02	3,07
12	16	Астрахань	2,74	2,34	2,52
13	20	Кызыл	4,07	3,78	3,95

Рис. 1. Гистограммы изменения напряжений в воздушных связях в случае монтажа при нулевой температуре для климатической области 6

Рис. 2. Гистограммы изменения напряжений в воздушных связях в случае монтажа при нулевой температуре для климатической области 9

Рис. 3. Гистограммы изменения напряжений в воздушных связях в случае монтажа при нулевой температуре для климатической области 16

Рис. 4. Гистограммы изменения напряжений в воздушных связях в случае монтажа при максимальной температуре летнего периода для климатической области 6

Рис. 5. Гистограммы изменения напряжений в воздушных связях в случае монтажа при максимальной температуре летнего периода для климатической области 9

Рис. 6. Гистограммы изменения напряжений в воздушных связях в случае монтажа при максимальной температуре летнего периода для климатической области 16

Табл. 3. Максимальные напряжения в воздушных связях

№ п/п	Номер климатической области	Наименования города	Напряжения в воздушных связях, мПа (σт)	
			в случае монтажа связей при нулевой температуре	в случае монтажа связей при максимальной летней температуре
1	5	Мурманск	37,3	54,9
2	6	Норильск	70,6	97,1
3	7	Анадырь	54,9	74,5
4	8	Архангельск	43,2	62,8
5	9	Москва	49,0	60,8
6	10	Томск	49,0	78,5
7	11	Иркутск	49,0	76,5
8	12	Владивосток	49,0	72,6
9	13	Магадан	53,0	72,6
10	14	Сочи	53,9	39,2
11	15	Челябинск	53,0	78,5
12	16	Астрахань	63,8	68,7
13	20	Кызыл	64,7	100,0

Табл. 4. Процентное соотношение от расчетного сопротивления материала связей

№ п/п	Процентное соотношение температурных напряжений в воздушных связях к пределу прочности материала связей для варианта монтажа при нулевой температуре							Процентное соотношение температурных напряжений в воздушных связях к пределу прочности материала связей для варианта монтажа при максимальной температуре летнего периода						
	160	200	250	300	350	400	450	160	200	250	300	350	400	450
1	23,3	18,6	14,9	12,4	10,6	9,3	8,3	34,3	27,5	22,0	18,3	15,7	13,7	12,2
2	44,1	35,3	28,2	23,5	20,2	17,7	15,7	60,7	48,5	38,8	32,4	27,7	24,3	21,6
3	34,3	27,5	22,0	18,3	15,7	13,7	12,2	46,6	37,3	29,8	24,8	21,3	18,6	16,6
4	27,0	21,6	17,3	14,4	12,3	10,8	9,6	39,2	31,4	25,1	20,9	17,9	15,7	13,9
5	30,7	24,5	19,6	16,3	14,0	12,3	10,9	38,0	30,4	24,3	20,3	17,4	15,2	13,5
6	30,7	24,5	19,6	16,3	14,0	12,3	10,9	49,0	39,2	31,4	26,2	22,4	19,6	17,4
7	30,7	24,5	19,6	16,3	14,0	12,3	10,9	47,8	38,3	30,6	25,5	21,9	19,1	17,0
8	30,7	24,5	19,6	16,3	14,0	12,3	10,9	45,4	36,3	29,0	24,2	20,7	18,1	16,1
9	33,1	26,5	21,2	17,7	15,1	13,2	11,8	45,4	36,3	29,0	24,2	20,7	18,1	16,1
10	33,7	27,0	21,6	18,0	15,4	13,5	12,0	24,5	19,6	15,7	13,1	11,2	9,8	8,7
11	33,1	26,5	21,2	17,7	15,1	13,2	11,8	49,0	39,2	31,4	26,2	22,4	19,6	17,4
12	39,8	31,9	25,5	21,3	18,2	15,9	14,2	42,9	34,3	27,5	22,9	19,6	17,2	15,3
13	40,5	32,4	25,9	21,6	18,5	16,2	14,4	62,5	50,0	40,0	33,3	28,6	25,0	22,2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенных работ установлено, что при расчете воздушных связей необходимо учитывать температурные воздействия, как существенно влияющие на связи. При этом анализ полученных данных показал, что при оценке влияния температурных деформаций на несущую способность воздушных связей определяющим является фактическая температура замыкания связевой системы свода. Температурные напряжения в зависимости от температуры замыкания могут изменяться до 60 %.

Запас несущей способности воздушных связей от температурных воздействий для большинства

климатических зон превышает 50 %, и может достигать 92 %. Для областей со значительными минусовыми температурами зимнего периода коэффициент использования связей может достигать 0,6–0,63.

В отсутствии данных о температуре замыкания распорной системы рекомендуется принимать максимальный температурный диапазон для учета температурных воздействий. При этом, в зависимости от прочностных характеристик материала связей в ходе проведенных исследований были выявлены коэффициенты использования воздушных связей от температурных воздействий: при пределе прочности материала связей до 200 МПа — 0,54; до 300 МПа — 0,35; до 450 МПа — 0,25; свыше 450 МПа — 0,2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернгард В.Р. Арки и своды. Руководство к устройству и расчету арочных и сводчатых перекрытий. Ч. 1. Устройство арок и сводов. СПб. : Типография Ю.Н. Эрлих, 1901. С. 97–100.
2. Пятницкий А.А., Махов И.О. Особенности конструкции и усиления металлических воздушных связей распорных систем памятников архитектуры // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 7. С. 67–71.
3. Лахтин Н.К. Расчет арок и сводов. Руководство по аналитическому и графическому расчету арочных и сводчатых перекрытий. М. : Типолитграфия Т-ва И.Н. Кушнеревъ и К^о, 1911. С. 372–393.
4. Бессонов Г.Б. Методические рекомендации. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. М. : Всесоюзное специализированное реставрационное производственное объединение «Союзреставрация», 1989. С. 100–107.
5. Подъяпольский С.С., Бессонов Г.Б., Беляев Л.А., Постников Т.М. Реставрация памятников архитектуры. М. : Стройиздат, 1988. 264 с.
6. Akhaveissy A.H., Milani G. Pushover analysis of large scale unreinforced masonry structures by means of a fully 2D non-linear model // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 41. Pp. 276–295. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.006
7. Çalik I., Bayraktar A., Türker T., Karadeniz H. Structural dynamic identification of a damaged and restored masonry vault using Ambient Vibrations // Measurement. 2014. Vol. 55. Pp. 462–472. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.05.030
8. Milani G., Cecchi A. Compatible model for herringbone bond masonry: Linear elastic homogenization, failure surfaces and structural implementation // International Journal of Solids and Structures. 2013. Vol. 50 (20–21). Pp. 3274–3296. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.05.032
9. Гарагаиш Б.А. Надежность пространственных регулируемых систем «сооружение-основание» при неравномерных деформациях основания. Сочи : Кубанькино, 2004. 908 с.
10. Atamturktur S., Sevim B. Seismic performance assessment of masonry tile domes through nonlinear finite-element analysis // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2012. Vol. 26. Issue 4. Pp. 410–423. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000243
11. Павлов В.В., Хорьков Е.В. Экспериментальные исследования работы усиленных кирпичных арок при горизонтальной подвижке опор // Известия КГАСУ. 2014. № 2 (28). С. 90–96.
12. Block P., Ciblac T., Ochsendorf J. Real-time limit analysis of vaulted masonry buildings // Computers & Structures. 2006. Vol. 84. Issue 29–30. Pp. 1841–1852. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.08.002
13. Пятницкая Т.А. Оперативный мониторинг памятников архитектуры // Вестник МГСУ. 2011. № 8. С. 28–32.
14. Kumagai R., Maeshima A. Constructive characteristics of catalan vault through the construction experiment of full scale floor model // AIJ Journal of Technology and Design. 2014. Vol. 20. Issue 44. Pp. 39–44. DOI: 10.3130/aijt.20.39
15. Пятницкий А.А., Махов И.О., Пыльцин М.А. Усиление сводчатых перекрытий здания-памятника // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 3 (44). С. 92–95.
16. Verstrynghe E., Schueremans L., Smars P. Controlled intervention: Monitoring the dismantlement and reconstruction of the flying buttresses of two Gothic churches // International Journal of Architectural Heritage. 2012. Vol. 6. Issue 6. Pp. 689–708. DOI: 10.1080/15583058.2011.605201
17. Густов Ю.И., Пятницкий А.А., Махов И.О. Исследование механических свойств и структуры

металлов реставрируемых строительных объектов // Вестник МГСУ. 2014. № 11. С. 90–97.

18. Шилин А.А., Пиеничный В.А., Карпузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. М.: Стройиздат, 2007. С. 153–154.

19. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Татиев Д.А., Чесноков Г.В., Покулаев К.В. Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками. Ч. 1. Состояние проблемы // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 3 (22). С. 117. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/19TVN314.pdf>

20. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Татиев Д.А., Чесноков Г.В., Покулаев К.В. Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками. Ч. 2. Применение метода предельных состояний к расчету растягиваемых и изгибаемых конструкций // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 3 (22). С. 118. <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN314.pdf>

21. Пятницкий А.А., Крутик С.А., Махов И.О. Новый способ усиления металлических конструкций памятников архитектуры // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 73–76.

Поступила в редакцию 24 марта 2019 г.

Принята в доработанном виде 12 апреля 2019 г.

Одобрена для публикации 25 мая 2019 г.

ОБ АВТОРЕ: **Махов Игорь Олегович** — преподаватель кафедры проектирования зданий и сооружений, заместитель начальника отдела инженерных изысканий и обследований Научно-исследовательского института проектирования, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, MahovIO@mgsu.ru.

INTRODUCTION

Vault structures were a widespread method of erection of flooring and roofs in landmark buildings of Russian civil and religious architecture from the X century AC. [1]. For accommodation of distance pieces of vault structures, systems of arches, flying buttresses, buttresses and aerial braces were used. Structurally, aerial braces were made as ties. The braces could be located in different levels within the vault, thereby the most widely spread was the location of the aerial braces in the skew backs of the vault.

Aerial braces are structural elements, accommodating the horizontal stress of the arch. They were made of wrought iron of different cross-sectional areas. The most common deem to be braces of rectangular cross-section from 10 to 50 cm² cross-sectional area [2]. Braces are elements without pick-up fittings in the span running in the cross-section of a vault as a single bar or several plates. The brace can be anchored both internally and externally, by means of a cotter-pin.

The real action of the aerial braces is for the time being very poorly studied, in particular, absolutely omitted is the problem of temperature deformations arising in the aerial braces. The most complete data on the aerial brace action are presented in works by N.K. Lakhtin [3] and G.B. Bessonov [4, 5].

The problem of the correct notion of the aerial brace action has gained significance in connection with a large number of restoration and reconstruction works carried out in landmark buildings in the country and abroad. For the time being, scientific research works

are carried out in connection with the study of the real action of the vault structures of architectural landmarks [6–8]. Methods are being developed for influence assessment of geotechnical conditions, including the seismicity, on the bearing strength of vaults [9–11], as well as for the assessment of the bearing strength of vault systems in real time [12, 13], and for reconstruction of vault structures [14]. Thereby, the bearing strength of vault systems often depends directly on the availability, state of preservation and the participation of the aerial braces, the fact being proven both by field surveys and theoretical studies [15, 16].

Presently, a number of studies of the actual aerial brace action has been carried out, in particular, for determining of the material of the braces [17] and their geometry specifications [2, 13], methods have been suggested for strengthening of the aerial braces [18–21]. Thereby the matter of the forces arising within the aerial ties is one of the key problems, in particular, the matter of temperature impacts. In accordance with paper [4], up to 70 % of the bearing strength of the aerial braces is required for the resistance to temperature deformations, which almost exclude the braces from the action of the vault structures. In their turn, field surveys and theoretical studies demonstrate deficiency of the bearing strength of the vaults without or after loss of the braces. Thus, the purpose hereof is the determining of the influence of temperature impacts on the strain-stress state (SSS) of the aerial braces. The finalization of forces arising from thermal impacts will in future help to correct the methods of the aerial brace strengthening previously suggested by the author [21].

MATERIALS AND METHODS

For assessment of the influence of the temperature stress on the bearing strength of the aerial braces, a computation analysis was carried out. Based on the information on standard structural schemes of the landmark buildings [2], the characteristic length of the aerial braces of 6 m was considered, equal to the typical span of the vault structures. In accordance with the data of scientific and technical literature and laboratory sample testing [17], the values of the strength limit of the material of the aerial braces can vary within the range from 160 to 450 MPa.

Averaged climatic data calculated on the basis of weather observations for the period 1988–2017 for 13 climatic regions of Russia were analysed. In each region, one of the biggest cities was taken as a reference point.

Considering the temperature data of the closure of the horizontal stress system irrevocably lost, two variants of the ambient temperature during the installation of the aerial braces were taken. The closure temperature variants were supposed based on the opportunities of construction and installation works available in X–XVII centuries AC. In the first case, zero temperature was taken for the installation moment of the aerial braces, which could correspond to the resumption of the construction works after the winter pause, showing strain of the temperature fluctuations of the winter and the summer periods, accordingly. In the second case, the maximum summer temperature of the year is taken, providing for maximum temperature strain in the winter period of the year. For all climate areas, average, maximum and minimum temperatures within the subject period were considered.

Calculations were made and the strain values were determined arising in the aerial braces at respective temperature elongation values obtained under recognition of different system closure temperatures. Totally 78 temperature graphs were obtained and analysed for different climate areas, with different closure temperatures of arched systems.

RESULTS OF THE STUDY

Based on the results of the conducted works, maximum temperature stress values in the aerial braces were determined at the impacts of the average, maximum and minimum temperatures for brace installation at the zero point (see Table 1), and at the maximum summer temperature (see Table 2).

For the majority of the climate areas, the elongation does not exceed 3 mm if the aerial brace is installed at the maximum summer temperature. If the brace is installed at zero temperature, the maximum elongation equals 2.8 mm, whereas the average value does not exceed 2 mm.

Based on the analysis of data arrays, bar graphs were made reflecting strain dynamics in the aerial braces within a year for different climatic areas. As an example, Figures 1–6 present bar diagrams of the characteristic climate regions with the lowest, the medium and the highest average annual temperatures.

Based on the results of the analysis of the obtained bar diagrams maximum strain values in the aerial braces were determined, in addition, the percentage of the design resistance of the material of the brace was determined (see Table 3, 4).

The analysis of the calculations shows that the temperature strain in the braces varies in the range from

Table 1. Maximum temperature stress values in aerial braces in case of their installation at the zero point

Pos.	Climate area number	City name	Maximum temperature deformations, mm		
			Maximum temperature	Minimum temperature	Average temperature
1	5	Murmansk	1.46	1.47	1.11
2	6	Norilsk	2.25	2.81	2.46
3	7	Anadyr	1.62	2.20	1.91
4	8	Archangelsk	1.71	1.41	1.36
5	9	Moscow	1.95	1.20	1.57
6	10	Tomsk	1.97	1.77	1.52
7	11	Irkutsk	1.93	1.96	1.50
8	12	Vladivostok	1.97	1.55	1.63
9	13	Magadan	1.52	2.12	1.67
10	14	Sochi	2.17	1.56	1.86
11	15	Chelyabinsk	2.10	1.79	1.68
12	16	Astrakhan	2.56	1.56	2.05
13	20	Kyzyl	2.20	2.60	2.25

Table 2. Maximum temperature stress values in aerial braces in case of their installation at maximum summer temperature

Pos.	Climate area number	City name	Maximum temperature deformations, mm		
			Maximum temperature	Minimum temperature	Average temperature
1	5	Murmansk	2.14	2.20	2.17
2	6	Norilsk	3.84	3.69	3.73
3	7	Anadyr	2.93	2.97	2.93
4	8	Archangelsk	2.52	2.32	2.42
5	9	Moscow	2.41	2.08	2.21
6	10	Tomsk	3.14	2.83	2.94
7	11	Irkutsk	3.05	2.92	2.95
8	12	Vladivostok	2.74	2.92	2.73
9	13	Magadan	2.73	2.87	2.72
10	14	Sochi	1.57	1.49	1.53
11	15	Chelyabinsk	3.15	3.02	3.07
12	16	Astrakhan	2.74	2.34	2.52
13	20	Kyzyl	4.07	3.78	3.95

Fig. 1. Bar graphs of strain dynamics in aerial braces in case of installation at zero temperature for climate area 6

Fig. 2. Bar graphs of strain dynamics in aerial braces in case of installation at zero temperature for climate area 9

Fig. 3. Bar graphs of strain dynamics in aerial braces in case of installation at zero temperature for climate area 16

Fig. 4. Bar graphs of strain dynamics in aerial braces in case of installation at the highest summer temperature for climate area 6

Fig. 5. Bar graphs of strain dynamics in aerial braces in case of installation at the highest summer temperature for climate area 9

Fig. 6. Bar graphs of strain dynamics in aerial braces in case of installation at the highest summer temperature for climate area 16

Table 3. Maximum strain values in aerial braces

Pos.	Climate area number	City name	Strain values in aerial braces, mPa (σ)	
			in case of zero installation temperature	in case of the highest summer installation temperature
1	5	Murmansk	37.3	54.9
2	6	Norilsk	70.6	97.1
3	7	Anadyr	54.9	74.5
4	8	Archangelsk	43.2	62.8
5	9	Moscow	49.0	60.8
6	10	Tomsk	49.0	78.5
7	11	Irkutsk	49.0	76.5
8	12	Vladivostok	49.0	72.6
9	13	Magadan	53.0	72.6
10	14	Sochi	53.9	39.2
11	15	Chelyabinsk	53.0	78.5
12	16	Astrakhan	63.8	68.7
13	20	Kyzyl	64.7	100.0

Table 4. Percentage of the design brace material resistance

Pos. No.	Temperature strain in aerial braces as percentage of the ultimate strength of the brace material for zero installation temperature							Temperature strain in aerial braces as percentage of the ultimate strength of the brace material for the highest summer installation temperature						
	160	200	250	300	350	400	450	160	200	250	300	350	400	450
1	23.3	18.6	14.9	12.4	10.6	9.3	8.3	34.3	27.5	22.0	18.3	15.7	13.7	12.2
2	44.1	35.3	28.2	23.5	20.2	17.7	15.7	60.7	48.5	38.8	32.4	27.7	24.3	21.6
3	34.3	27.5	22.0	18.3	15.7	13.7	12.2	46.6	37.3	29.8	24.8	21.3	18.6	16.6
4	27.0	21.6	17.3	14.4	12.3	10.8	9.6	39.2	31.4	25.1	20.9	17.9	15.7	13.9
5	30.7	24.5	19.6	16.3	14.0	12.3	10.9	38.0	30.4	24.3	20.3	17.4	15.2	13.5
6	30.7	24.5	19.6	16.3	14.0	12.3	10.9	49.0	39.2	31.4	26.2	22.4	19.6	17.4
7	30.7	24.5	19.6	16.3	14.0	12.3	10.9	47.8	38.3	30.6	25.5	21.9	19.1	17.0
8	30.7	24.5	19.6	16.3	14.0	12.3	10.9	45.4	36.3	29.0	24.2	20.7	18.1	16.1
9	33.1	26.5	21.2	17.7	15.1	13.2	11.8	45.4	36.3	29.0	24.2	20.7	18.1	16.1
10	33.7	27.0	21.6	18.0	15.4	13.5	12.0	24.5	19.6	15.7	13.1	11.2	9.8	8.7
11	33.1	26.5	21.2	17.7	15.1	13.2	11.8	49.0	39.2	31.4	26.2	22.4	19.6	17.4
12	39.8	31.9	25.5	21.3	18.2	15.9	14.2	42.9	34.3	27.5	22.9	19.6	17.2	15.3
13	40.5	32.4	25.9	21.6	18.5	16.2	14.4	62.5	50.0	40.0	33.3	28.6	25.0	22.2

8.3 to 44.1 % of the design resistance of the brace material at zero system closure temperature; and from 8.7 to 62.5 % at the maximum summer temperature of the system closure. Thereby the average temperature strain values are from 33 to 45 %.

CONCLUSION AND DISCUSSION

Based on the result of the work carried out, it was determined that calculations of aerial braces should consider the temperature impact as an essential influence factor of the braces. Thereby, the analysis of the obtained data has shown that in the assessment of the influence of the temperature stress on the bearing strength of the aerial braces, the key factor is the actual closure temperature of the bracing system of the vault.

Temperature strain values, depending upon the closure temperature, can change within 60 %.

The safety factor of the bearing strength of the aerial braces in terms of the temperature impact exceeds for most climate areas 50 % and can reach 92 %. For regions with very low winter temperatures, the utilization of the braces can reach 0.6–0.63.

In absence of data on the horizontal stress system closure, the maximum temperature range shall be taken to consider temperature impacts. Thereby, dependent upon the strength specifications of the brace material, utilization values of aerial braces at different temperature impacts were determined in the course of the studies: 0.54 at tensile strength of the brace material 200 MPa; 0.35 at up to 300 MPa; 0.25 at up to 450 MPa; 0.2 at over 450 MPa.

REFERENCES

1. Berngard V.R. *Arches and vaults. Guide to the device and the calculation of arched and vaulted ceilings. Part 1. The device arches and arches*. Saint-Petersburg, Tipografiya Yu.N. Erlikh Publ., 1901; 97-100. (rus.).
2. Pyatnitsky A.A., Makhov I.O. Features of design and strengthening of metal air connections of arch systems of Architectural monuments. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 7:67-71. (rus.).
3. Lahtin N.K. *Calculation of arches and vault. A guide to analytical and graphical calculations of arched and vaulted ceilings*. Moscow, The Lithographic Printing Partnership I.N. Kushnerev and Company Publ., 1911; 372-393. (rus.).
4. Bessonov G.B. *Guidelines. Investigation of deformations, calculation of bearing capacity and constructive strengthening of ancient spacer systems*. Moscow, All-Union Specialized Restoration Production Association "Soyuzrestavratsiya" Publ., 1989; 100-107. (rus.).
5. Podyapolsky S.S., Bessonov G.B., Belyaev L.A., Postnikova T.M. *Restoration of architectural monuments*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 264. (rus.).

6. Akhaveissy A.H., Milani G. Pushover analysis of large scale unreinforced masonry structures by means of a fully 2D non-linear model. *Construction and Building Materials*. 2013; 41:276-295. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.006
7. Çalık I., Bayraktar A., Türker T., Karadeniz H. Structural dynamic identification of a damaged and restored masonry vault using Ambient Vibrations. *Measurement*. 2014; 55:462-472. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.05.030
8. Milani G., Cecchi A. Compatible model for her-ringbone bond masonry: Linear elastic homogenization, failure surfaces and structural implementation. *International Journal of Solids and Structures*. 2013; 50(20-21):3274-3296. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.05.032
9. Garagash B.A. *Reliability of spatial adjustable systems "base-structure" with uneven deformations of the base*. Sochi, Kubankino Publ., 2004; 908. (rus.).
10. Atamturktur S., Sevim B. Seismic performance assessment of masonry tile domes through non-linear finite-element analysis. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2012; 26(4):410-423. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000243
11. Pavlov V.V., Khorkov E.V. Experimental studies of the work of reinforced brick arches in the horizontal movement of supports. *News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2014; 2(28):90-96. (rus.).
12. Block P., Ciblac T., Ochsendorf J. Real-time limit analysis of vaulted masonry buildings. *Computers & Structures*. 2006; 84(29-30):1841-1852. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.08.002
13. Pyatnickaya T.A. Real-time monitoring of architecture monuments. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 8:28-32. (rus.).
14. Kumagai R., Maeshima A. Constructive characteristics of catalan vault through the construction experiment of full scale floor model. *AIJ Journal of Technology and Design*. 2014; 20(44):39-44. DOI: 10.3130/aijt.20.39
15. Pyatnitskiy A.A., Makhov I.O., Pyl'tsin M.A. Strengthening the arched coverings of the memorial building. *Proceedings of Civil Engineers*. 2014; 3(44):92-95. (rus.).
16. Verstrynghe E., Schueremans L., Smars P. Controlled intervention: Monitoring the dismantlement and reconstruction of the flying buttresses of two Gothic churches. *International Journal of Architectural Heritage*. 2012; 6(6):689-708. DOI: 10.1080/15583058.2011.605201
17. Gustov Ju.I., Pjatnickij A.A., Mahov I.O. The research of mechanical properties and structure of metals of restored building objects. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering] 2014; 11:90-97. (rus.).
18. Shilin A.A., Pshenichnyj V.A., Kartuzov D.V. *External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials*. Moscow, Strojizdat Publ., 2007; 153-154. (rus.).
19. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Tatiyev D.A., Chesnokov G.V., Pokulayev K.V. Strengthening of metal structures with fiber reinforced polymers. Part 1. State of the problem. *Online Journal of Science*. 2014; 3(22):117. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/19TVN314.pdf> (rus.).
20. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Tatiyev D.A., Chesnokov G.V., Pokulayev K.V. Strengthening of metal structures with fiber reinforced polymers. Part 2. Using the method of limit states to calculate bending and rupture structures. *Online Journal of Science*. 2014; 3(22):118. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN314.pdf> (rus.).
21. Pjatnickij A.A., Krutik S.A., Mahov I.O. A new method for strengthening the metal structures of architectural monuments. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 3:73-76. (rus.).

Received March 24, 2019

Adopted in a modified form on April 12, 2019

Approved for publication May 25, 2019

BIONOTES: **Igor O. Makhov** — lecturer of academic chair of Design of buildings and structures, Depute head of research and surveys NIIP, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, 129337, Moscow, Russian Federation, MahovIO@mgsu.ru.