

# Строительные конструкции, здания и сооружения Structural units, buildings, structures

Научная статья

УДК 69.022.32

DOI: 10.14529/build250204

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ П-ОБРАЗНЫХ КРОНШТЕЙНОВ НАВЕСНЫХ ФАСАДНЫХ СИСТЕМ

**А.Х. Байбурин<sup>✉</sup>, С.Е. Барыбин**

*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия*

<sup>✉</sup> [baiburinak@susu.ru](mailto:baiburinak@susu.ru)

**Аннотация.** В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований натуральных образцов П-образных кронштейнов, производимых ООО «ИНСИ стальные конструкции» для навесных вентилируемых фасадов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения надежности и безопасности фасадных систем, подверженных воздействию ветровых нагрузок. Целью работы являлось определение фактической несущей способности и деформативных характеристик П-образных кронштейнов различных типоразмеров, подвергаемых воздействию статических и горизонтальных ветровых нагрузок. Для достижения поставленной цели использовалась методика экспериментальных испытаний натуральных образцов с последующим анализом полученных данных. Экспериментальные исследования были дополнены конечно-элементным анализом (МКЭ) тех же кронштейнов в программном комплексе ANSYS. Проводился анализ как прочностных, так и деформационных характеристик. В ходе эксперимента было испытано 20 образцов двух типоразмеров кронштейнов с различными вариантами сечений. Сопоставление результатов МКЭ и натуральных экспериментов позволило определить максимальную допустимую нагрузку для каждого типа кронштейна, а также подтвердить достоверность моделирования. Полученные результаты имеют практическую значимость для проектирования надежных и безопасных навесных фасадных систем.

**Ключевые слова:** навесные фасадные системы, П-образные кронштейны, напряженно-деформированное состояние, ветровая нагрузка, конечно-элементный анализ

**Для цитирования.** Байбурин А.Х., Барыбин С.Е. Напряженно-деформированное состояние П-образных кронштейнов навесных фасадных систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2025. Т. 25, № 2. С. 30–36. DOI: 10.14529/build250204

Original article

DOI: 10.14529/build250204

## STRESS-STRAIN STATE OF U-SHAPED BRACKETS OF SUSPENDED FACADE SYSTEMS

**A.K. Baiburin<sup>✉</sup>, S.E. Barybin**

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*

<sup>✉</sup> [baiburinak@susu.ru](mailto:baiburinak@susu.ru)

**Abstract.** This article presents the results of the experimental studies of the full-scale samples of U-shaped brackets manufactured by INSI Steel Structures LLC for suspended ventilated facades (curtain walling). The relevance of the study is determined by the need to ensure the reliability and safety of facade systems exposed to wind loads. The goal of the work was to determine the actual bearing capacity and stress-related characteristics of U-shaped brackets of various sizes exposed to static and horizontal wind loads. This goal is achieved using the method of experimental testing of full-scale samples followed by the analysis of the obtained data. Experimental studies were supplemented by the finite element analysis (FEM) of the same brackets in the ANSYS software package. Both strength and strain characteristics were analyzed. During the experiment, 20 samples of two standard sizes of brackets with different cross-sections were tested. The comparison of the results of the FEM and field experiments allowed determining the maximum permissible

load for each type of bracket, as well as confirmed simulation reliability. The obtained results are of practical importance for the design of reliable and safe suspended facade systems.

**Keywords:** suspended facade systems, U-shaped brackets, stress-strain state, wind load, finite element analysis

**For citation.** Baiburin A.K., Barybin S.E. Stress-strain state of U-shaped brackets of suspended facade systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2025;25(2):30–36. (in Russ.). DOI: 10.14529/build250204

## Введение

Анализ напряженно-деформированного состояния элементов навесных фасадных систем (НФС) проводится с целью его предиктивного моделирования и внесения корректировок для оптимизации конструкции еще на этапе проектирования. Оценка напряженно-деформированного состояния базируется на применении графоаналитических методов, конечно-элементном моделировании, а также данных экспериментальных наблюдений. Ветровая нагрузка выступает в качестве одного из ключевых факторов, детерминирующих напряженно-деформированное состояние П-образных кронштейнов [1, 2].

Воздействие ветра порождает статические и пульсационные нагрузки, способные инициировать предельные состояния отдельных компонентов П-образных кронштейнов. При этом возникновение таких состояний может быть обусловлено синергетическим эффектом высоких скоростей ветра и пониженной массой фасадных панелей [3–5]. Комплексный и всесторонний учет ветровых воздействий на стадии разработки проектов НФС обеспечивает формирование рациональных предпосылок для оптимизации расхода материалов, составляющих их каркас [6–9].

Цель настоящего исследования заключается в изучении специфики влияния ветровых нагрузок в сочетании с весом фасадных панелей на напряженно-деформированное состояние П-образных кронштейнов, используемых в навесных фасадных системах.

## Методика проведения испытаний

Одним из способов верификации расчётной модели в программном комплексе является его проверка на достоверность по деформациям [8]. С целью определения фактической несущей способности и деформационных характеристик П-образных кронштейнов были выполнены экспериментальные испытания 20 образцов, представленных двумя типоразмерами (по 10 образцов). Испытание натуральных образцов проводилось в лаборатории кафедры «Строительные конструкции и сооружения» ЮУрГУ, при температуре +15 °С. Все образцы испытывались на перемещение П-образного кронштейна в трех точках:

- 1-я точка расположена в центре полки кронштейна на расстоянии 60 мм от стенки кронштейна для измерения прогиба стенки кронштейна относительно стены;

- 2-я точка расположена на краю кронштейна для измерения вертикального перемещения края кронштейна от прогиба полки и стенки кронштейна;

- 3-я точка расположена на расстоянии ближайшего отверстия от стенки кронштейна для измерения сужения полки кронштейна в этом месте.

Деформационные испытания П-образных кронштейнов проводились с применением тарированных грузов, а также гидравлического домкрата для моделирования горизонтальной ветровой составляющей. Нагружение осуществлялось в концевой части кронштейна через подвесную систему. Крепление системы к кронштейнам соответствовало месту крепления направляющей для фасадных панелей, имитируя реальную схему нагружения. Вертикальная нагрузка прикладывалась на высоте 70 мм от окончания П-образного кронштейна, а горизонтальная – на удалении 650 мм от его стенки. Нагружение образцов осуществлялось поэтапно посредством груза (5,16 кг) домкрата. Показания микрометра регистрировались после каждого этапа изменения нагрузки от домкрата. Подобные методики проведения расчётов и испытаний описаны в [10–15].

## Результаты и обсуждение

В табл. 1 и 2 приведены результаты перемещений трех точек П-образных кронштейнов № 1 и № 2. Полученные результаты являются среднестатистическими по 10 измерениям каждого типоразмера П-образного кронштейна.

Графики, отражающие сравнение результатов эксперимента и расчетной модели в программном комплексе ANSYS, приведены на рис. 1 для П-образного кронштейна вылетом 12,5 см и рис. 2 для П-образного кронштейна вылетом 25 см. Для 1-й и 2-й точки результаты измерений перемещения от изначального положения у кронштейна вылетом 12,5 см (см. рис. 1а,б) в 2,5 раза больше кронштейна вылетом 25 см (см. рис. 2а,б). Для 3-й точки перемещения у кронштейна вылетом 12,5 см (см. рис. 1в) в 1,5 раза меньше, чем у кронштейна вылетом 25 см (рис. 2в).

По перемещениям отмеченных точек полученные результаты соответствуют опытным данным. Максимальная погрешность не превышает 5 %. Наступление предельного состояния П-образным кронштейном при преимущественном растяжении наступает при достижении им 4–5 % от пластических деформаций (СП 294.1325800.2017, пп. 4.4.2).

Таблица 1

Результаты испытания П-образных кронштейнов №1 с длиной консоли 12,5 см

№ этапа	Горизонтальная нагрузка, кгс	Перемещения точек кронштейна, мм		
		1-я точка	2-я точка	3-я точка
1	15	0	0	0
2	25	0,241	0,29	0,6
3	50	0,673	0,53	1,22
4	75	1,114	0,68	2,29
5	100	1,488	0,766	3,05
6	125	1,858	0,823	3,94
7	150	2,217	0,88	4,63

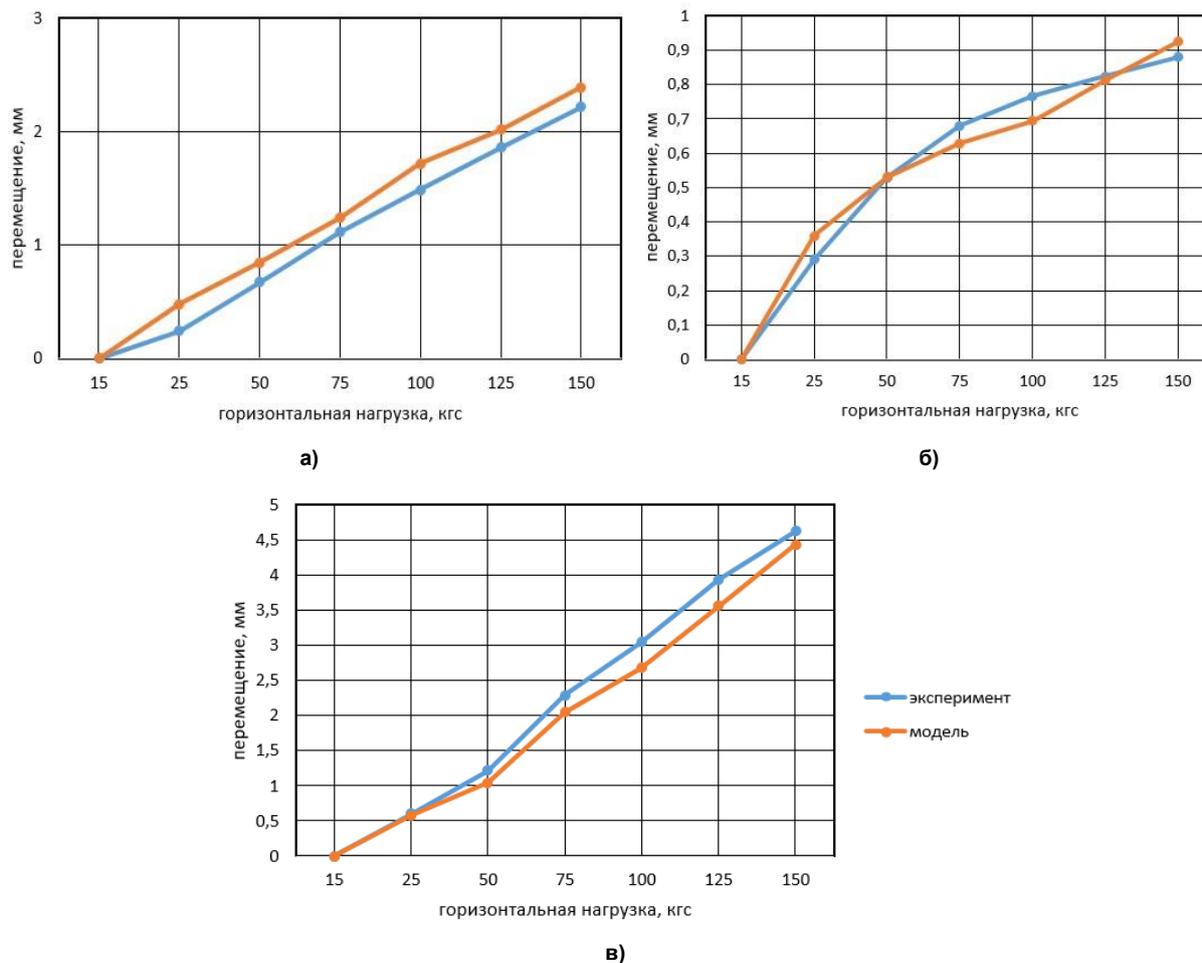


Рис. 1. Результаты испытания П-образного кронштейна с длиной консоли 12,5 см: а – в 1-й точке; б – во 2-й точке; в – в 3-й точке

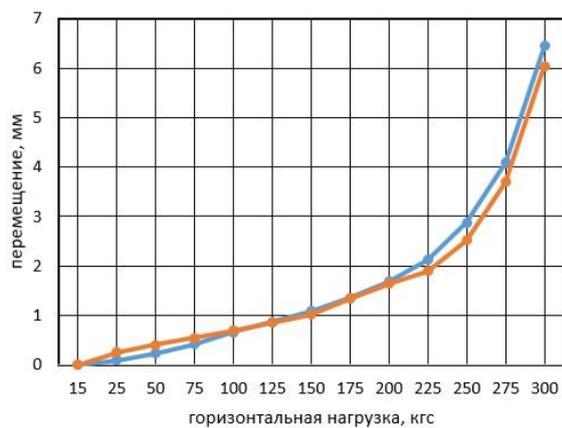
Таблица 2

Результаты испытания П-образных кронштейнов № 2 с длиной консоли 25 см

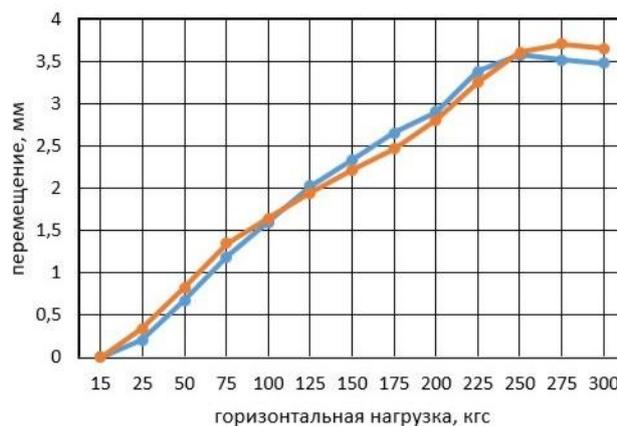
№ этапа	Горизонтальная нагрузка, кгс	Перемещения точек кронштейна, мм		
		1-я точка	2-я точка	3-я точка
1	15	0	0	0
2	25	0,096	0,203	0,76
3	50	0,238	0,677	2,11
4	75	0,414	1,191	3,73
5	100	0,657	1,601	5,4
6	125	0,869	2,031	6,61
7	150	1,086	2,34	7,59

Окончание табл. 2

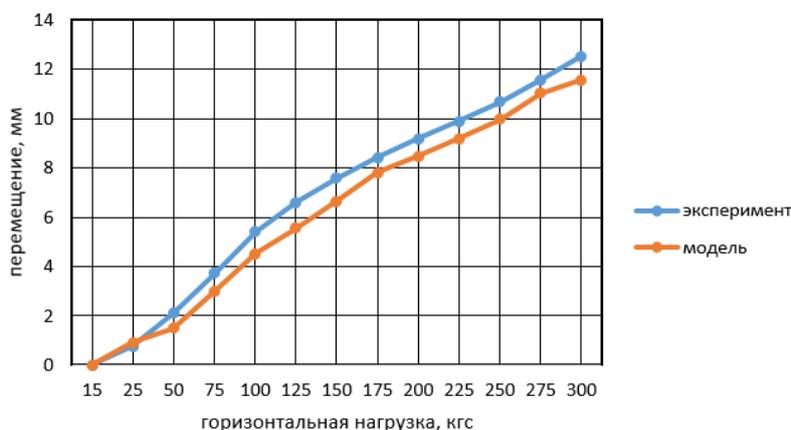
№ этапа	Горизонтальная нагрузка, кгс	Перемещения точек кронштейна, мм		
		1-я точка	2-я точка	3-я точка
8	175	1,355	2,653	8,43
9	200	1,688	2,907	9,19
10	225	2,127	3,38	9,9
11	250	2,877	3,583	10,67
12	275	4,088	3,52	11,57
13	300	6,445	3,484	12,52



а)



б)



в)

Рис. 2. Результаты испытания П-образного кронштейна с длиной консоли 25 см:  
а – в 1-й точке; б – во 2-й точке; в – в 3-й точке

По результатам анализа пластических деформаций, полученных из расчётной модели:

– для П-образного кронштейна № 1 предельное состояние наступило при достижении 150 кгс (1471 Н) горизонтальной составляющей усилий в пяте П-образного кронштейна и составило 4,0 % (рис. 3);

– для П-образного кронштейна № 2 предельное состояние наступило при достижении 300 кгс (2942 Н) горизонтальной составляющей в пяте П-образного и составило 4,29 % (рис. 4).

Результаты экспериментов и расчетов могут быть частным случаем в области исследования П-образных кронштейнов по двум причинам [10–15]:

1) рассматривают Г-образный или иной тип кронштейна;

2) прикладывают этапы нагружений в вертикальном направлении без учёта горизонтальной составляющей.

Выводы [6] имеют частичную схожесть с полученными результатами по причине того, что исследовался П-образный кронштейн и случай

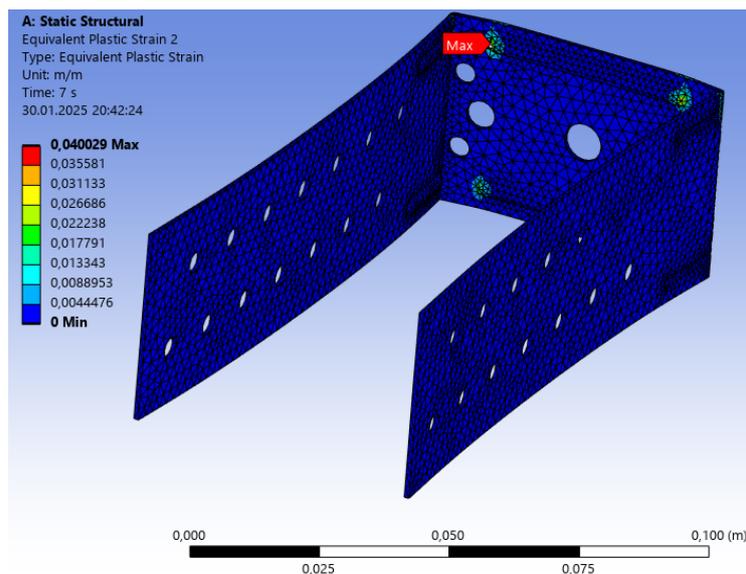


Рис. 3. Изополя пластических деформаций П-образного кронштейна с длиной консоли 12,5 см

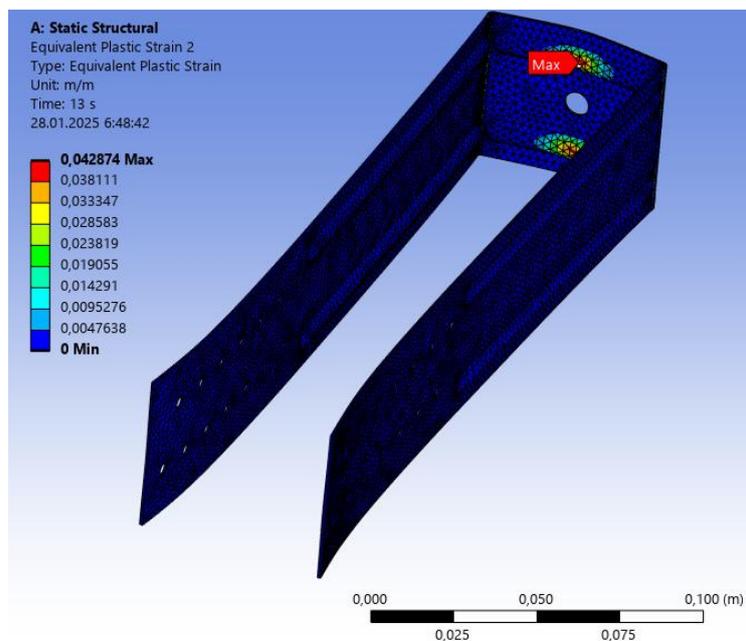


Рис. 4. Изополя пластических деформаций П-образного кронштейна с длиной консоли 25 см

с горизонтальным приложением нагрузки без вертикального груза. Эти выводы подтверждают полученные результаты в том, что предельное состояние П-образного кронштейна наступает в её пяте (см. рис. 3, 4).

#### Выводы

Оценка ветрового воздействия необходима при определении параметров несущей способности элементов навесных фасадных систем (НФС). Современные программные комплексы, такие как ANSYS, обеспечивают возможность динамическо-

го мониторинга деформаций, обусловленных смоделированными нагрузочными воздействиями и граничными условиями, что существенно облегчает решение данной задачи. Эксперименты и расчеты показали, что предельное состояние рассмотренных кронштейнов наступает при нагрузке 150 и 300 кгс (1471 и 2942 Н).

Предложен комплексный метод определения предельного состояния П-образных кронштейнов под действием ветровых нагрузок в узле НФС, позволяющий анализировать их поведение в критических условиях нагружения.

## Список литературы

1. Акбиев Р.Т., Чубаков М.Ж., Морозова Т.В. Комплексная оценка и сравнительный анализ динамической устойчивости и конструктивной безопасности навесных фасадных систем // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2012. № 1. С. 62–69.
2. Алисултанов Р.С., Рубцов Р.И. Стенд для испытаний навесных фасадных систем // Научное обозрение. 2017. № 18. С. 42–49.
3. Чередниченко Т.Ф., Чеснокова О.Г. Фасадные системы в архитектуре и строительстве. Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2022. 167 с.
4. Казакевич М.И. Основы расчетов сооружений на ветровые воздействия: монография. М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2021. 180 с.
5. Аэродинамика зданий и сооружений: учебное пособие для вузов / М.И. Казакевич, О.И. Поддаева, А.Н. Федосова, П.С. Чуринов; под ред. А.А. Локтева. СПб.: Лань, 2024. 138 с.
6. Рыков С.Г., Сидоров А.И. Область применения несущих кронштейнов в навесных фасадных системах // Технология строительства. 2016. № 4. С. 46–50.
7. Поддаева О.И., Кубенин А.С., Чуринов П.С. Архитектурно-строительная аэродинамика: учебное пособие. М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2015. 88 с.
8. Montazery H., Blocken B. CFD simulation of wind-induced pressure coefficient on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis // Building and Environment. 2013. Vol. 60, pp. 137–149.
9. Dogan T., Kastner P. Streamlined CFD simulation framework to generate wind-pressure coefficients on building facades for airflow network simulations // Building Simulation. 2021. Vol. 14, pp. 1189–1200.
10. Шмелев Г.Н., Сусаров А.В., Хайрулин Л.Р. Напряженно-деформированное состояние несущих кронштейнов навесных фасадных систем // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 4 (22). С. 186–192.
11. Конструкции рационального углового кронштейна крепления стоечно-ригельной фасадной системы к зданию / А.С. Антонов, Р.Э. Алитдинова, Г.Н. Шмелев, И.Р. Валиев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 3 (69). С. 106–117.
12. Кронштейн навесной фасадной системы / А.С. Антонов, Л.А. Билалов, М.Д. Зиганшин и др. // Молодежь и XXI век. Материалы VI Международной молодежной научной конференции: в 4 т. 2016. Т. 3. С. 200–202.
13. Галямичев А.В., Кирикова В.А., Герасимова Е.Н. Несущая способность крепления навесных фасадных систем к сэндвич-панелям // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 2 (78). С. 30–46.
14. Kolaczowski M., Byrda A. FEM Analysis and Experimental Research into Carrier Brackets in Ventilated Facades // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2020. Vol. 64 (3), pp. 792–800.
15. Карпов С.Ю., Фроловская А.В. Анализ напряжений несущих стальных кронштейнов каркаса навесных фасадных систем «Краспан» // Постулат. 2017. № 7. С. 14.

## References

1. Akbiev R.T., Chubakov M.Zh., Morozova T.V. [Comprehensive assessment and comparative analysis of the dynamic stability and structural safety of ventilated facade systems]. *Prirodnye i tehnogennye riski. Bezopasnost' sooruzhenij* [Natural and man-made risks. Safety of structures], 2012, no. 1, pp. 62–69. (in Russ.)
2. Alisultanov R.S. [Test bench for hinged facade systems]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific review], 2017, no. 18, pp. 42–49. (in Russ.)
3. Cherednichenko T.F., Chesnokova O.G. *Fasadnye sistemy v arhitekture i stroitel'stve* [Facade systems in architecture and construction]. Volgograd: VolgGTU Publ., 2022, 167 p. (in Russ.)
4. Kazakevich M.I. *Osnovy raschetov sooruzhenij na vetrovye vozdejstviya: monografiya* [Fundamentals of calculations of structures for wind impacts: monograph]. Moscow, MISI–MGSU Publ., 2021. 180 p. (in Russ.)
5. Kazakevich M.I., Poddaeva O.I., Fedosova A.N., Churin P.S. *Ajerodinamika zdaniy i sooruzhenij: uchebnoe posobie dlja vuzov* [Aerodynamics of buildings and structures: textbook for universities]. Ed. by A.A. Loktev. St. Petersburg: Lan', 2024. 124 p. (in Russ.)
6. Rykov S.G., Sidorov A.I. [Scope of application of load-bearing brackets in ventilated facade systems]. *Tehnologija stroitel'stva* [Construction technology], 2016, no. 4, pp. 46–50. (in Russ.)
7. Poddaeva O.I., Kubenin A.S., Churin P.S. *Arhitekturno-stroitel'naja ajerodinamika: uchebnoe posobie* [Architectural and construction aerodynamics: textbook]. Moscow, MISI–MGSU Publ., 2015, 88 p. (in Russ.)
8. Montazery H., Blocken B. CFD simulation of wind-induced pressure coefficient on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 2013, vol. 60, pp. 137–149.
9. Dogan T., Kastner P. Streamlined CFD simulation framework to generate wind-pressure coefficients on building facades for airflow network simulations. *Building Simulation*, 2021, vol. 14, pp. 1189–1200.

10. Shmelev G.N., Susarov A.V., Khayrulin L.R. [Stress-strain state of load-bearing brackets of ventilated facade systems]. *Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [News of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering], 2012, pp. 186–192. (in Russ.)

11. Antonov A.S., Alitdinova R.E., Shmelev G.N., Valiev I.R. [Constructions of a rational angular bracket for fastening a post-and-beam facade system to a building]. *Izvestija Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [News of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering], 2024, no. 3(69), pp. 106–117. (in Russ.)

12. Antonov A.S., Bilalov L.A., Ziganshin M.D., Kuritsin V.S., Shmelev G.N. [Bracket of a ventilated facade system]. *Molodezh' i XXI vek. Materialy VI Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii: v 4 tomah* [Youth and the 21st century. Proceedings of the VI International Youth Scientific Conference: in 4 volumes]. 2016, vol. 3, pp. 200–202. (in Russ.)

13. Galyamichev A.V., Kirikova V.A., Gerasimova E.N. [Bearing capacity of fastening ventilated facade systems to sandwich panels]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal* [Civil Engineering Journal], 2018, no. 2, pp. 30–46. (in Russ.)

14. Kolaczowski M., Byrdy A. FEM Analysis and experimental research into carrier brackets in ventilated facades. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2020, vol. 64 (3), pp. 792–800.

15. Karpov S.Yu., Frolovskaya A.V. [Stress analysis of load-bearing steel brackets of the frame of “Kraspan” ventilated facade systems]. *Postulat* [Postulate], 2017, no. 7, pp. 14. (in Russ.)

***Информация об авторах:***

**Байбурин Альберт Халитович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительное производство и теория сооружений», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; baiburin@susu.ru

**Барыбин Семен Евгеньевич**, магистрант кафедры «Строительное производство и теория сооружений», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; semenbarybin@mail.ru

***Information about the authors:***

**Albert Kh. Baiburin**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Construction Production and Theory of Structures, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; baiburin@susu.ru

**Semen E. Barybin**, Master's degree student of the Department of Construction Production and Theory of Structures, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; semenbarybin@mail.ru

***Статья поступила в редакцию 31.01.2025, принята к публикации 10.02.2025.***

***The article was submitted 31.01.2025, approved after reviewing 10.02.2025.***