

УДК 691.342

doi: 10.33622/0869-7019.2023.06.17-23

Прочность и деформативность навесных фасадных панелей из полимербетона

Кирилл Владимирович АВДЕЕВ¹, зам. генерального директора – главный инженер, 6136133@mail.ru

Михаил Александрович ТУЧИН¹, зав. сектором отдела конструктивных систем № 2, m.tuchin@cniipz.com

Никита Андреевич КУДРЯВЦЕВ¹, инженер, n.kudryavtsev@cniipz.com

Владимир Викторович БОБРОВ^{1,2}, кандидат технических наук, зав. сектором отдела обследований зданий и сооружений № 1, доцент НИУ МГСУ, vbobrov1985@bk.ru

Екатерина Владимировна ДОМАРОВА^{1,2}, инженер, старший преподаватель, cathie_p@mail.ru

¹ Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий, 127238 Москва, Дмитровское ш., 46, корп. 2

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. Исследование вопросов, посвященных проектированию и применению навесных фасадных систем из современного высокотехнологичного сырья для ограждающих конструкций, обусловлено необходимостью обновления традиционных для России технологий проектирования и строительства, а также увеличением доли инновационных продуктов в строительстве, локализацией на территории страны новых высокотехнологичных производств строительных материалов и систем. Авторами статьи проведен цикл испытаний на прочность и деформативность плоских декоративно-облицовочных панелей из полимербетона со способом крепления через закладной элемент. Цель исследования состояла в определении возможности использования панелей длиной почти четыре метра для строительства в Москве или районах с эквивалентной ветровой нагрузкой. Испытания включали в себя определение прочности при сжатии, плотности, модуля упругости и коэффициента Пуассона материала. Кроме того, проведены испытания на срез, продавливание и отрыв закладного элемента. Панели испытывали на вертикальную нагрузку, отрицательную и положительную ветровые нагрузки. Облицовочные панели из полимербетона выдержали расчетную и двойную расчетную нагрузки. Экспериментально было подтверждено, что изделия из полимербетона подобной конструкции могут использоваться в Москве или районах с эквивалентной ветровой нагрузкой. Полученные результаты можно применять в практических расчетах и проектировании.

Ключевые слова: плоские декоративно-облицовочные панели, полимербетон, прочность, плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона, испытания панелей на ветровую нагрузку

Для цитирования: Авдеев К. В., Тучин М. А., Кудрявцев Н. А., Бобров В. В., Домарова Е. В. Прочность и деформативность навесных фасадных панелей из полимербетона // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 6. С. 17–23. doi: 10.33622/0869-7019.2023.06.17-23

STRENGTH AND DEFORMABILITY OF SUSPENDED FACADE PANELS MADE OF POLYMER CONCRETE

Kirill V. AVDEEV¹, 6136133@mail.ru

Mikhail A. TUCHIN¹, m.tuchin@cniipz.com

Nikita A. KUDRYAVTSEV¹, n.kudryavtsev@cniipz.com

Vladimir V. BOBROV^{1,2}, vbobrov1985@bk.ru

Ekaterina V. DOMAROVA^{1,2}, cathie_p@mail.ru

¹ Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – TsNIIPromzdaniy, Dmitrovskoe shosse, 46, korp. 2, Moscow 127238, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. The study of issues related to the design and application of suspended facade systems made of modern high-tech raw materials for enclosing structures is due to the need to update traditional Russian design and construction technologies, as well as an increase in the share of innovative products in construction, localization of new high-tech production of building materials and systems in the country. The authors of the article conducted a cycle of tests for the strength and deformability of flat decorative facing panels made of polymer concrete with a method of fastening through an embedded element. The purpose of the study was to determine the possibility of using almost four meters long panels for construction in Moscow or in areas with an equivalent wind load. The test cycle included the determination of compressive strength, density, modulus of elasticity and Poisson's ratio of the material. In addition,

tests for shear, punching and tearing of the embedded element were carried out. The panels were tested for vertical load, negative and positive wind loads. Facing panels made of polymer concrete withstood the design and double design loads. It was experimentally confirmed that polymer concrete products of a similar design can be used in Moscow or in areas with an equivalent wind load. The results obtained can be applied in practical calculations and design.

Keywords: flat decorative facing panels, polymer concrete, strength, density, modulus of elasticity, Poisson's ratio, testing of panels for wind load

For citation: Avdeev K. V., Tuchin M. A., Kudryavtsev N. A., Bobrov V. V., Domarova E. V. Strength and Deformability of Suspended Facade Panels Made of Polymer Concrete. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2023, no. 6, pp. 17–23. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2023.06.17-23

Конструктивное решение и отделка фасада влияют на архитектурно-художественный облик здания, который зависит от типа строительного материала, варианта обработки поверхности, цветового решения, освещения и других факторов [1–6]. Выбор варианта фасада определяется конструктивным решением несущих наружных элементов, а также прочностью [7, 8], долговечностью, плотностью материала фасада, экономичностью и технологичностью монтажа [9].

К наиболее популярным решениям фасада можно отнести такие варианты, как декоративная фасадная штукатурка, натуральный камень, облицовочные панели, облицовочный кирпич, фасадная плитка, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки [10–14].

Для отделки фасада наряду с традиционными отделочными материалами (бетон, кирпич, дерево) в последнее время применяются новые облицовочные материалы, которые не уступают по характеристикам традиционным, но изготовлены из современного высокотехнологичного сырья, в частности из полимербетона [15, 16]. В его составе не содержится цемент как в обычных бетонах, а входят наполнители из молотого доломита, кварца и мрамора, связующее из смолы, пластификаторы, отвердители, красители. Полимербетон обладает многими преимуществами, такими как низкий собственный вес, высокая механическая прочность, короткий период отверждения, высо-

кая адгезия, износостойкость, атмосферостойкость, водонепроницаемость. При применении специальных добавок данный материал пожаробезопасен.

Архитектурный декор ARHIO из полимербетона впервые в России начала производить в 2006 г. компания «Идеальный Камень» [17]. В настоящее время компания внедряет в практику строительства навесные фасадные панели из полимербетона. Поверхность таких стеновых панелей может иметь разнообразную фактуру, что позволяет придать выразительный запоминающийся внешний облик зданию и расширить возможности для архитекторов.

Лаборатория ЦНИИПромзданий в апреле 2023 г. завершила испытания панелей в рамках работы «Испытание на прочность и деформативность плоских декоративно-облицовочных панелей со способом крепления через закладной элемент». Был выполнен цикл тестов для верификации аналитических моделей и подтверждения механической безопасности панелей и их креплений. Испытания проводились с целью определения экспериментальным путем прочностных характеристик декоративно-облицовочных панелей длиной до 3,7 м с последующим заключением о возможности использования данного типа изделий при строительстве в Москве или районах с эквивалентной ветровой нагрузкой.

¹ ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

² ГОСТ 12730.1–2020 «Бетоны. Методы определения плотности».

³ ГОСТ 24452–80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона».

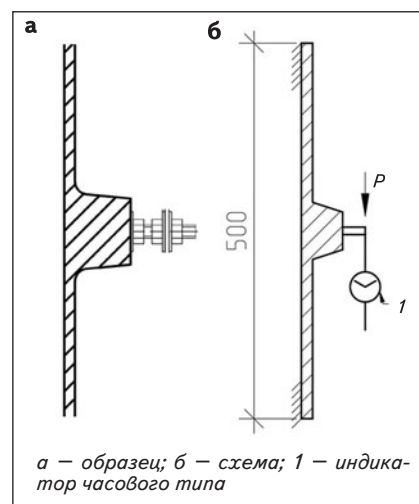


Рис. 1. Испытания закладного элемента на срез

Испытания включали определение прочности при сжатии, плотности, модуля упругости и коэффициента Пуассона материала. Закладной элемент испытывали на срез, продавливание и отрыв, панели — на вертикальную нагрузку, отрицательную и положительную ветровые нагрузки.

Кубиковая прочность полимербетона при испытании по стандарту¹ составляет 70,2 МПа. Средняя плотность материала определялась согласно нормативу² и равна 1740 кг/м³.

Испытания по определению модуля упругости и коэффициента Пуассона проводились по документу³ на призмах из полимербетона (размер 100×100×400 мм). Для измерения деформаций применялись индикаторы часового типа (ИЧ).

Начальное усилие обжатия составляло 0,3 кН. Образец нагружался до уровня нагрузки 210 кН (30 % разрушающей нагрузки) ступенями, равными 10 % ожидаемой разрушающей нагрузки. На каждой ступени была выдержка нагрузки 5 мин. Скорость нагружения принималась равной 0,5 МПа/с. Испытание проводилось при нормальных условиях среды (температура 24 °С, влажность 54,4 %, атмосферное давление 99,190 кПа). Результаты испытаний призм приведены в *таблице*.

Испытания *на срез* закладного элемента полимербетонной плиты выполняли на образце полимербетонного изделия (*рис. 1*). Было испытано три образца размером 500×500 мм. Образцы закрепляли по двум сторонам к испытательному стенду (*рис. 2а*). Деформации измеряли с помощью ИЧ. Образец нагружался до расчетной нагрузки 5 кН ступенями, равными $0,1P_p$, с последующей выдержкой 30 мин. Время выдержки на каждом промежуточном нагружении составило 2 мин. Все образцы выдержали расчетную нагрузку (*рис. 3а*). После образцы были разгружены и испытаны на срез с целью определения разрушающей нагрузки (*рис. 3б*). Нагружение производилось ступенями, равными $0,2P_p$.

Исходя из результатов контроля испытания на срез заклад-



Рис. 2. Образец для испытания на срез

Деформационные характеристики полимербетона

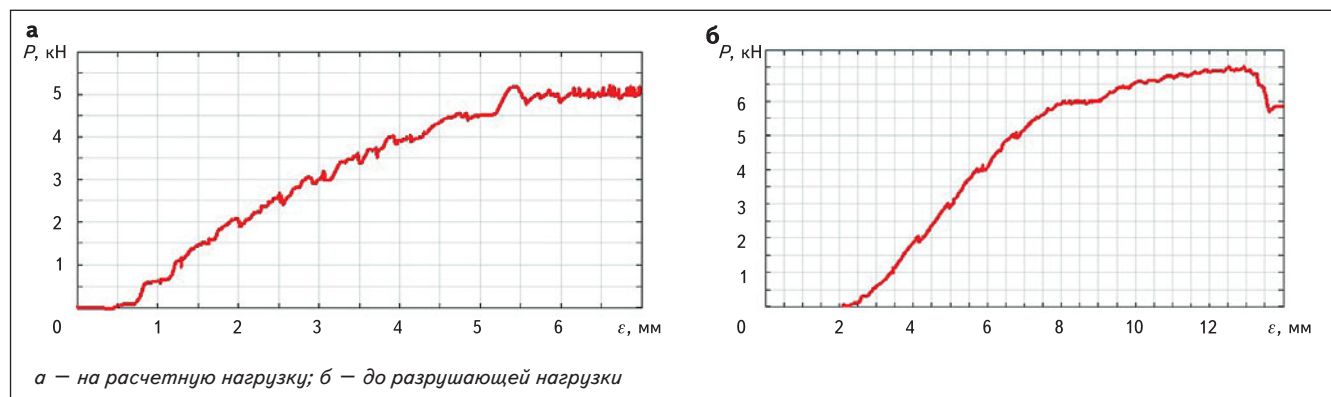
Образец	Модуль упругости E_{σ} , МПа	Коэффициент Пуассона μ
№ 1–1	11 600	0,295
№ 1–2	11 000	0,256
№ 1–3	11 300	0,295
№ 1–4	11 300	0,288
Усредненные экспериментальные данные	11 300	0,284

ного элемента полимербетонной плиты следует, что разрушающая нагрузка составила 7,01 кН при деформациях 12,49 мм. Образец после разрушения представлен на *рис. 2б*.

При испытании *на продавливание* образец закреплялся к испытательному стенду закладным элементом *вверх* (*рис. 4*). Закладной элемент зажимался в комплектные приспособления к

универсальной испытательной машине. Деформации в центре испытательного образца замерялись с помощью ИЧ. Образец нагружался ступенями, равными 0,4 кН. Время выдержки на каждом промежуточном нагружении – 2 мин. По результатам испытания на продавливание установлено, что разрушающая нагрузка составила 2,89 кН, при этом прогиб равен 12,98 мм (*рис. 4б*).

Рис. 3. График изменения деформаций при испытании на срез закладного элемента



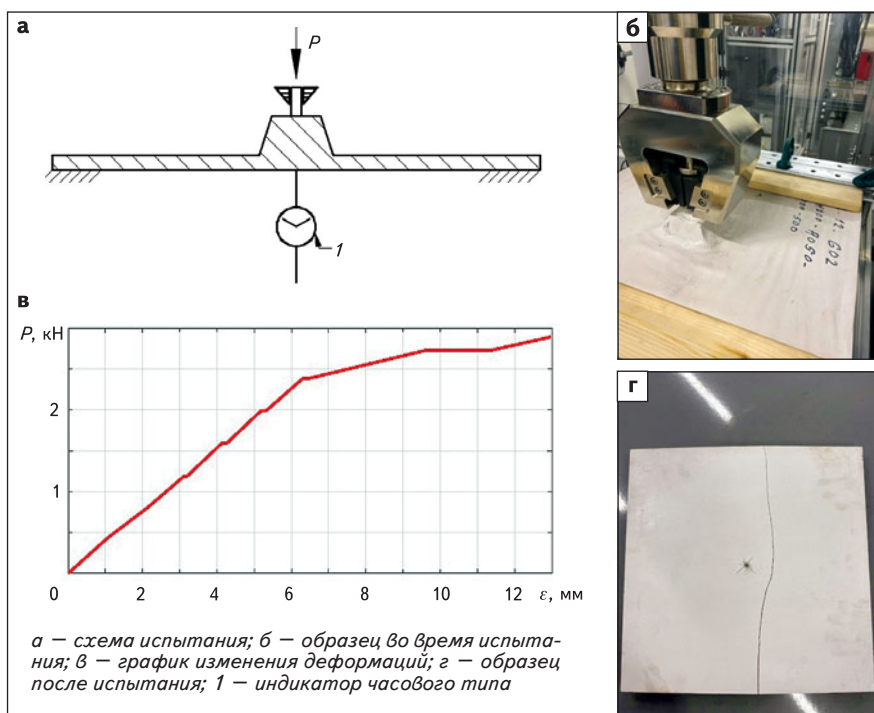


Рис. 4. Испытание закладного элемента на продавливание

ме производителя «РОНСОН», состоящей из кронштейнов вылетом 260 мм, вертикальных профилей (гнутой уголок 40×3 мм) и горизонтальных направляющих профилей особой формы (55×35×25×3 мм). Для измерения деформаций применялись ИЧ в количестве 3 шт., установленные под нижней гранью панели (рис. 6). Каждый образец нагружался до расчетной нагрузки 5,1 кН (рис. 7а) ступенями, равными $0,1P_p$, до двойной расчетной нагрузки 10,2 кН (рис. 7б) ступенями, равными $0,2P_p$, далее — ступенями, равными 1 кН. Время выдержки на каждом промежуточном нагружении составило 2 мин, на расчетной нагрузке — 30 мин, на двойной расчетной нагрузке — 30 мин, на максимальной нагрузке — 8 ч.

Система крепления панелей устроена таким образом, что собственный вес панелей и действующая вертикальная нагрузка передаются на верхний ряд кронштейнов. При испытании панели на вертикальную нагрузку при достижении определенных перемещений действующая нагрузка начинает передаваться не только на верхний ряд, но и на нижние кронштейны. В результате панель и система кронштейнов могут воспринять нагрузку значительно большую, чем расчетная. Так, при испытании при расчетной нагрузке 5,1 кН панель выдержала нагрузку 17,65 кН. При действии максимальной нагрузки были отмечены деформации подсистемы панели. Дальнейшее приложение нагрузки не производилось в связи с отсутствием эксплуатационной необходимости.

Для определения разрушающей нагрузки плиты из полимербетона на положительную ветровую нагрузку испытывался образец размером 3700×1900 мм, который закреплялся закладными элементами вниз к испытатель-

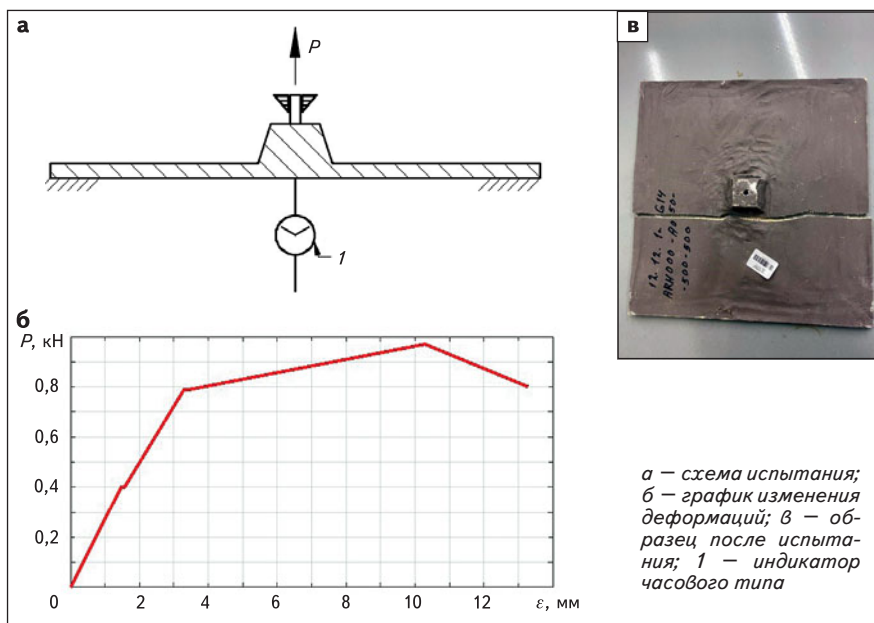


Рис. 5. Испытание закладного элемента на отрыв

При испытании на отрыв образец также закреплялся к испытательному стенду закладным элементом вверх (рис. 5). Испытания выполняли аналогично испытанию на продавливание. По результатам испытания на отрыв установлено, что разрушающая нагрузка составила 0,97 кН,

при этом прогиб был 10,29 мм (рис. 5).

С целью определения несущей способности полимербетонной панели на действие вертикальной нагрузки были испытаны образцы размером 2500×1300 мм. Они закреплялись закладными элементами к навесной подсисте-

ному стенду (рис. 8а). Для измерения деформаций применялись ИЧ в количестве 6 шт. (рис. 8б).

Расчетная распределенная горизонтальная (ветровая) нагрузка $P_{р.вет} = 1,2$ кПа выбрана исходя из пиковой ветровой расчетной нагрузки, характерной для зданий и сооружений в Москве. Перевод распределенной нагрузки в эквивалентную производился по аналитической модели, учитывающей физико-механические свойства материала и вес системы нагружения. Образец нагружался до расчетной нагрузки 1,2 кПа ступенями, равными $0,1P_p$, до двойной расчетной нагрузки 2,4 кПа – ступенями, равными $0,2P_p$, до разрушающей нагрузки – ступенями, равными 200 Н. Время выдержки на расчетной нагрузке и на двойной расчетной нагрузке – 30 мин каждая.

При нагрузке 3983 Н (или распределенной нагрузке 12,75 кПа), в

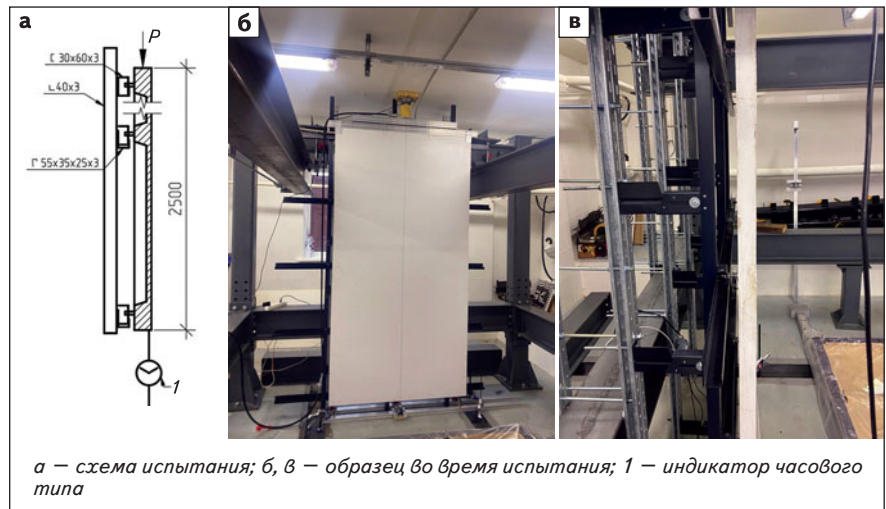


Рис. 6. Испытание полимербетонной панели на вертикальную разрушающую нагрузку

панели появились признаки начинающегося разрушения по схеме продавливания, что соответствует излому деформаций на графике (рис. 9). Разрушение образца произошло по контуру нагрузителя (рис. 10б) при нагрузке 5,2 кН и деформациях 47,34 мм (рис. 9б).

Для определения разрушающей нагрузки панели из полимербетона на отрицательную ветровую нагрузку испытывался аналогичный образец, но который закреплялся закладными элементами вверх к испытательному стенду. Схема приложения

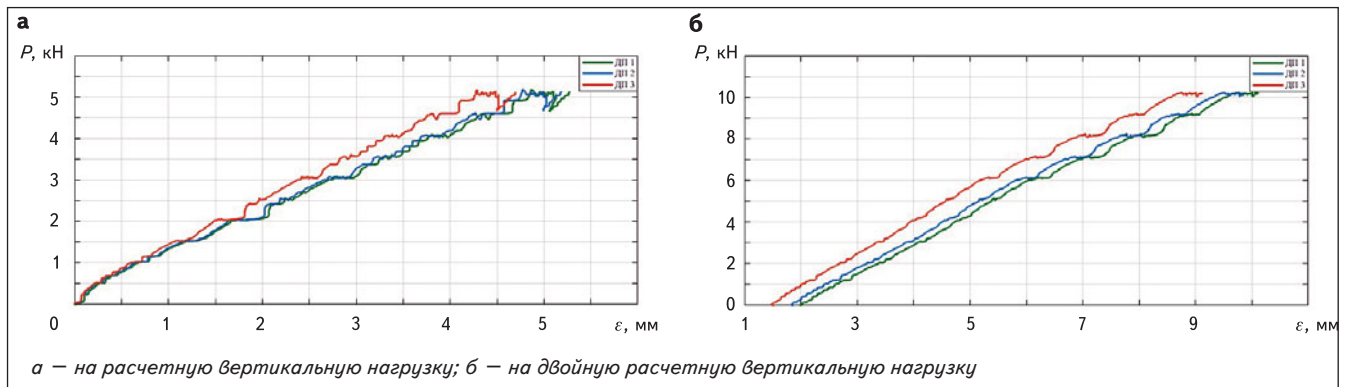
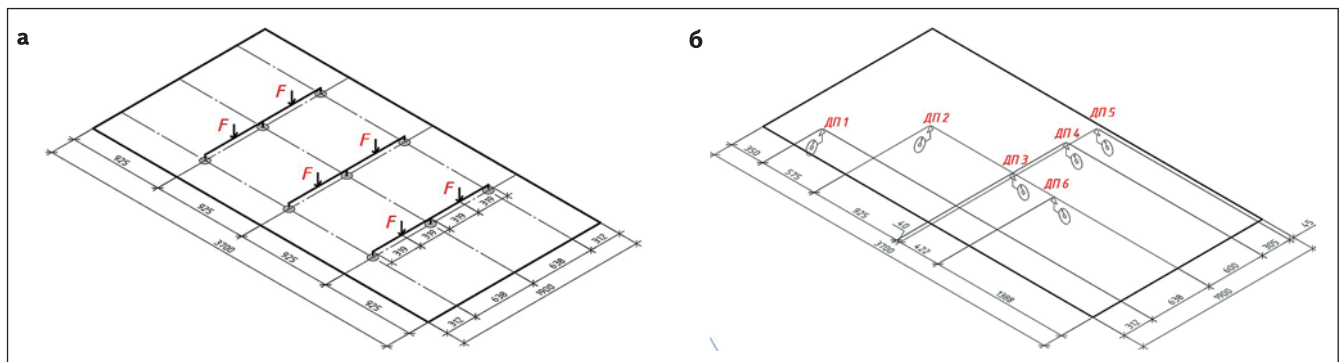


Рис. 7. График изменения деформаций при испытании полимербетонной панели

Рис. 8. Схемы загрузки панели (F – прилагаемое усилие) для испытания на положительную ветровую нагрузку (а) и установки датчиков перемещения (ДП) часового типа (б)



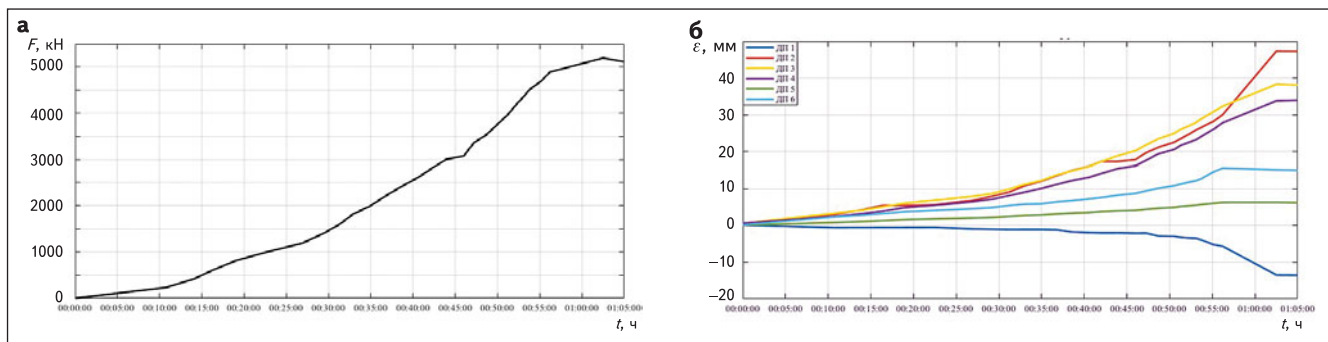


Рис. 9. Графики изменения нагрузки (а) и деформаций (б) при испытании на положительную ветровую нагрузку F

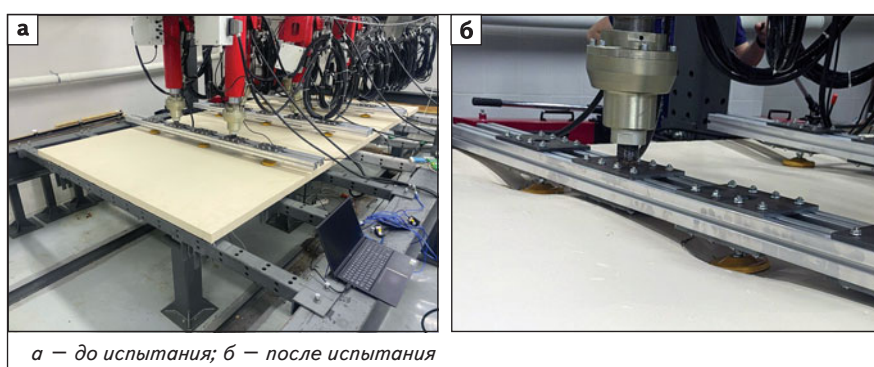


Рис. 10. Испытание полимербетонной панели на положительную ветровую нагрузку

нагрузки была такой же. При расчетной нагрузке 1,2 кПа максимальные деформации составили 1,96 мм, образец не имел повреждений. При действии двойной расчетной нагрузки 2,4 кПа максимальные деформации бы-

ли 4,26 мм, повреждения отсутствовали. Максимальная равномерно распределенная нагрузка составила 10,57 кПа (что соответствует $F = 3217$ Н), при которой начиналось разрушение по контуру нагрузителя диамет-

ром 100 мм из-за продавливания плиты.

Вывод

Цикл испытаний плоских декоративно-облицовочных панелей из полимербетона показал их высокие прочностные характеристики. Экспериментальным путем было подтверждено, что изделия из полимербетона подобной конструкции длиной до 3,7 м с креплением через закладной элемент могут использоваться при проектировании и строительстве навесных фасадных систем при пиковых нагрузках 1,2 кПа. Это — перспективный вариант фасадных стеновых навесных панелей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Павлычева Е. А., Пикалов Е. С. Характеристика современных материалов для облицовки фасадов и цоколей зданий и сооружений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 4. С. 55–61.
2. Алиев С. А. Материал облицовочных панелей как основа типологического разнообразия навесных фасадных систем // Архитектура и дизайн. 2020. № 1. С. 1–14. doi: 10.7256/2585-7789.2020.1.35714
3. Пичкалова А. Д. Виды наружной отделки фасадов зданий // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2022. № 8-2(71). С. 49–56. doi: 10.24412/2500-1000-2022-8-2-49-56
4. Лебедев А. А., Агеева М. С. Анализ современных стеновых материалов // Наука и инновации в строительстве : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. к 165-летию со дня рождения В. Г. Шухова (Белгород, 17 апреля 2018 г.). Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2018. С. 389–395.
5. Пронина Т. В. Инновации некоторых традиционных облицовочных материалов в фасадостроении // Перспективы науки. 2019. № 2(113). С. 52–60.
6. Федотов А. С. Анализ существующих материалов для облицовки фасадов в малоэтажном домостроении // Региональное развитие. 2017. № 3. С. 17.
7. Бедов А. И., Гайсин А. М., Габитов А. И. [и др.] Напряженно-деформированное состояние конструкций несущих стен из высокопустотных керамических изделий // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 3. С. 58–63.
8. Малахова А. Н. Несущая способность и долговечность наружных кирпичных стен зданий // Строительство и реконструкция. 2022. № 1(99). С. 29–39. doi: 10.33979/2073-7416-2022-99-1-29-39
9. Mansour A., Mansour H., Al-Dawery S.-K. Sustainable self-cleaning treatments for architectural facades in developing countries // Alexandria Engineering Journal. 2018. Vol. 57. No. 2. Pp. 867–873.

10. Генералова Е. М., Генералов В. П. Современные особенности формирования архитектурного облика зданий из сборного железобетона // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12. № 2. С. 83–97. doi: 10.17673/10.17673/Vestnik.2022.02.12
11. Рожина М. Д., Поваренко Д. Д., Любомирский А. В. Керамогранит как материал отделки навесных фасадов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2019. № 5(80). С. 7–13. doi: 10.18720/CUBS.80.1
12. Фаликман В. Р., Денискин В. В. Архитектурный бетон в эпоху устойчивого развития // Высокопрочные цементные бетоны: технологии, конструкции, экономика (Казань, 25–27 октября 2016 г.). Казань: Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2016. С. 77.
13. Paech C. Structural membranes used in modern building facades // Procedia Engineering. 2016. Vol. 155. P. 61–70.
14. Pakravan H. R., Ozbakkaloglu T. Synthetic fibers for cementitious composites: A critical and in-depth review of recent advances // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 207. Pp. 491–518. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.078
15. Jingjing Shen, Jianwei Liang, Xinfeng Lin et al. Recent progress in polymer-based building materials // International Journal of Polymer Science. 2020. Vol. 2020. P. 15. doi: 10.1155/2020/8838160
16. Колосова А. С., Сокольская М. К., Виткалова И. А. [и др.] Современные полимерные композиционные материалы и их применение // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 5-1. С. 245–256.
17. Официальный сайт производителя фасадного декора Архио. URL: <https://www.arhio.ru/> (дата обращения: 01.05.2023).

REFERENCES

1. Pavlycheva E. A., Pikalov E. S. Characteristics of modern materials for facing facades and basements of buildings and structures. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2020, no. 4, pp. 55–61. (In Russ.)
2. Aliev S. A. Cladding panel material as the basis for the typological variety of hinged facade systems. *Arkhitektura i dizayn*, 2020, no. 1, pp. 1–14. (In Russ.). doi: 10.7256/2585-7789.2020.1.35714
3. Pichkalova A. D. Types of exterior decoration of building facades. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 2022, no 8-2(71), pp. 49–56. (In Russ.). doi: 10.24412/2500-1000-2022-8-2-49-56
4. Lebedev A. A., Ageeva M. S. Analysis of modern wall materials. *Nauka i innovatsii v stroitel'stve: Sbornik dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii k 165-letiyu so dnya rozhdeniya V.G. Shukhova*. Belgorod, BGTU im. V. G. Shukhova Publ., 2018, pp. 389–395. (In Russ.).
5. Pronina T. V. Innovations in some traditional facing materials for facades. *Perspektivy nauki*, 2019, no. 2(113), pp. 52–60. (In Russ.).
6. Fedotov A. S. Analysis of existing materials for facing facades in low-rise housing construction. *Regional'noe razvitiye*, 2017, no. 3, pp. 17. (In Russ.).
7. Bedov A. I., Gaisin A. M., Gabitov A. I. et al. Stress-strain state of structures of bearing walls made of high-hollow ceramic products. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2017, no. 3, pp. 58–63. (In Russ.).
8. Malakhova A. N. Bearing capacity and durability of external brick walls of buildings. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*, 2022, no. 1, pp. 29–39. (In Russ.). doi: 10.33979/2073-7416-2022-99-1-29-39
9. Mansour A., Mansour H., Al-Dawery S.-K. Sustainable self-cleaning treatments for architectural facades in developing countries. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, vol. 57, no. 2, pp. 867–873.
10. Generalova E. M., Generalov V. P. Modern features of the formation of the architectural appearance of buildings from precast concrete. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 83–97. (In Russ.). doi: 10.17673/10.17673/Vestnik.2022.02.12
11. Rozhina M. D., Povarenko D. D., Lyubomirskiy A. V. Ceramic granite as a material for suspended ventilated facades. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*, 2019, no. 80(1), pp. 7–13. (In Russ.). doi: 10.18720/CUBS.80.1
12. Falikman V. R., Denisikin V. V. Architectural concrete in the era of sustainable development. *Vysokoprochnye tsementnye betony: tekhnologii, konstruksii, ekonomika* (Kazan, October 25–27, 2016.) Kazan, Kazan State University of Architecture and Engineering Publ., 2016, pp. 77. (In Russ.).
13. Paech C. Structural membranes used in modern building facades. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 155, pp. 61–70.
14. Pakravan H. R., Ozbakkaloglu T. Synthetic fibers for cementitious composites: a critical and in-depth review of recent advances. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 207, pp. 491–518. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.078
15. Jingjing Shen, Jianwei Liang, Xinfeng Lin et al. Recent progress in polymer-based building materials. *International Journal of Polymer Science*, 2020, vol. 2020, pp. 15. doi: 10.1155/2020/8838160
16. Kolosova A. S., Sokolskaya M. K., Vitkalova I. A. et al. Modern methods of preparation polymer composite materials and products from them. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2018, no. 5-1, pp. 245–256. (In Russ.).
17. Official website of the manufacturer of facade decor Arhio. Available at: <https://www.arhio.ru/> (accessed: 01.05.2023). (In Russ.).