

А. А. ПИЩУЛЕВ
Е. О. МАНЯХИНА

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЗДАНИЙ С КОНСОЛЬНЫМИ ЭТАЖАМИ

ANALYSIS OF STRUCTURAL SOLUTIONS FOR BUILDINGS WITH CANTILEVERED FLOORS

Рассмотрены конструктивные решения для зданий с консольными этажами вылетом более 20 м. Представлены примеры объектов, в которых реализованы аналогичные консольные этажи и их конструктивные особенности. Предложен вариант реализации консольного этажа длиной более 20 м, где в качестве стержневой пространственной конструкции принята балка коробчатого сечения. Выполнен расчет с применением расчетного комплекса ЛИРА-САПР. Получены значения моментов и перерезывающих сил для консолей длиной от 21 до 39 м. Выделены основные достоинства предложенного конструктивного решения и приведены возможные варианты его исполнения.

Ключевые слова: консольный этаж, балка коробчатого сечения, стержневые системы, железобетонные конструкции, пространственные конструкции

В настоящее время крупные города нуждаются в потребности возведения уникальных зданий и сооружений, создающих индивидуальность архитектурного облика. Консольные конструкции создают эффект нависания верхних этажей, что является архитектурной особенностью, позволяющей сооружению одержать визуальную победу над законами гравитации. Здания, которые являлись бы полностью консольными, встречаются редко и зачастую имеют консоли с небольшими вылетами.

Constructive solutions for buildings with cantilevered floors with a span of more than 20 m are considered. Examples of objects in which similar cantilever floors and their design features are presented. The implementation variant of a cantilever floor with a length of more than 20 m is proposed, where a box-shaped beam is adopted as a core spatial structure. The calculation was performed using the LIRA-CAD calculation complex. The values of moments and cutting forces for consoles with a length from 21 to 39 m are obtained. The main advantages of the proposed constructive solution are highlighted and possible variants of its execution are given.

Keywords: cantilever floor, box-section beam, rod systems, reinforced concrete structures, spatial structures

Сегодня самарским архитектором Д.Ю. Храмовым предложен эскиз здания современного искусства, расположенный на набережной Волги в Самаре (рис. 1). По замыслу автора проектируемое здание весьма выразительно и может претендовать на здание нового архитектурного акцента города. Однако эта задача является достаточно сложной с конструктивной точки зрения и требует дополнительного анализа и исследования в области существующих конструктивных схем, материалов и принципиальных подходов к реализации данных проектов.

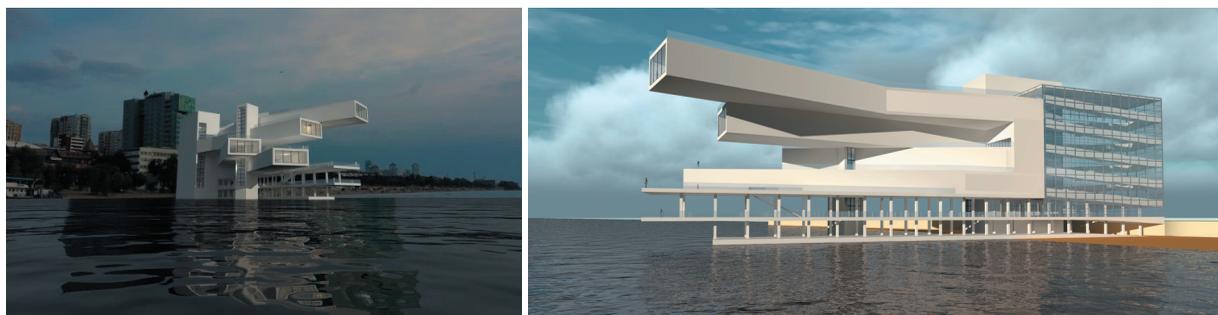


Рис. 1. Модель проектируемого здания

Зарубежный опыт строительства показывает, что реализация таких конструкций возможна. Так, одним из примеров является здание штаб-квартиры компании GasNatural в Барселоне, возведенное в 2005 г. Оно имеет весьма сложную форму, а также свою главную особенность – 40-метровую консоль высотой в пять этажей (рис. 2). Несущая конструкция консоли выполнена из металлических второстепенных и главных балок таврового сечения с применением сталежелезобетона.

Другой пример – штаб-квартира компании «Statoil ASA» в городе Ставангер, Норвегия (рис. 3). Здание состоит из пяти модулей, три из которых консольные, с общим атриумом. Сами консоли представляют собой стальной каркас от фирмы «Ruukki», выполненный в виде прямоугольной фермы с параллельными поясами высотой в три этажа, с дополнительными горизонтальными элементами, на которые опираются балки таврового сечения с перфорированной стенкой. По балкам уложены железобетонные плиты перекрытия. Масса одного элемента каркаса может достигать значения до 100 т. Максимальная длина консоли составляет 33 м, ширина – 23 м.

Архитектурной студией «AND» было разработано здание отеля «Aggrenad» (рис. 4). Здание расположено на острове Кодже в Южной Корее, имеет консольные этажи длиной 10 м, направленные в разные стороны. Консоли представляют собой монолитные железобетонные балки, выполненные в виде швеллера с небольшим уклоном от основания к краю.

Анализ рассмотренных вариантов позволяет выявить некую закономерность применения конструктивных решений в том или ином случае. Например, при реализации консольных этажей стараются выполнить консоль в три и более этажей, при этом за счет увеличения

плеча внутренних пар сил снижаются усилия в наиболее растянутых и сжатых элементах. Как правило, в створе стеновых конструкций устраивают сегментную ферму, устойчивость сжатых раскосов которых обеспечивается за счет приемыкания к ним элементов перекрытия.

Устройство одноэтажных консолей является более сложной задачей, так как при незначительной высоте порядок растягивающих и сжимающих усилий кратно возрастает [4]. Эта задача может решаться эффективно путем применения рациональных сечений, когда ограждающие конструкции одновременно выполняют и несущие функции. Одним из примеров данного решения является применение балок коробчатого сечения или ферменные конструкции (рис. 5).

Для анализа был произведен сбор полезной и снеговой нагрузок на здание, соответствующих городу Самаре, для сравнительного анализа различных видов конструктивного решения консоли. Значения данных нагрузок представлены в табл. 1.

Значение полезной нагрузки было принято в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» (табл. 8.3) как для выставочных залов. Был произведен расчет с применением расчетного комплекса ЛИРА-САПР (рис. 6) и получены значения моментов и перерезывающих сил для консолей длиной от 21 до 39 м. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Для реализации консольного этажа в соответствии с эскизом (см. рис. 5) рассмотрим результаты исследования консольного этажа вылетом 21, 30 и 39 м соответственно на действие вертикальных нагрузок. Элементные модели консолей показаны на рис. 7 и 8. В данной статье представлены результаты расчета в линейной постановке для определения картины напряженно-деформированного состояния конструкций и порядка максимальных напряжений.

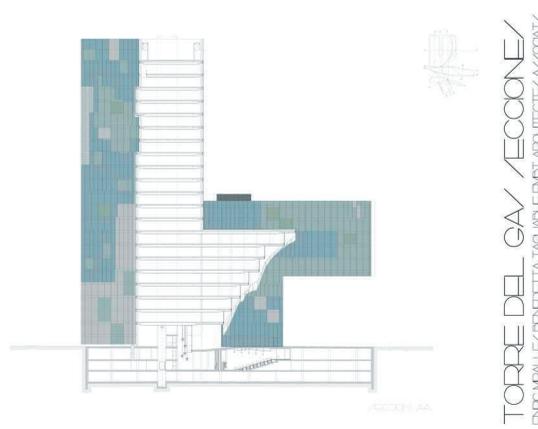
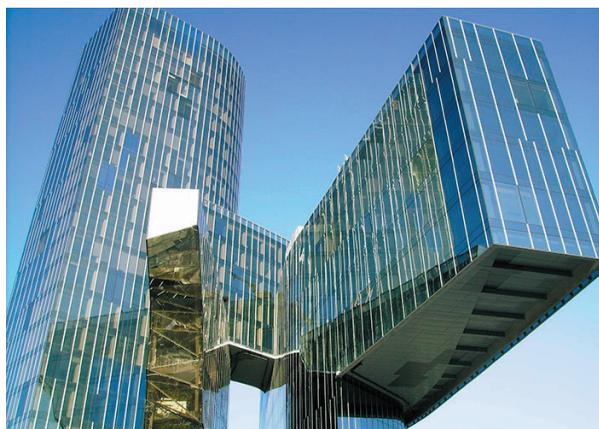


Рис. 2. Штаб-квартира компании GasNatural в Барселоне, Испания [1]



Рис. 3. Штаб-квартира компании «Statoil ASA» в городе Ставангер, Норвегия [2]

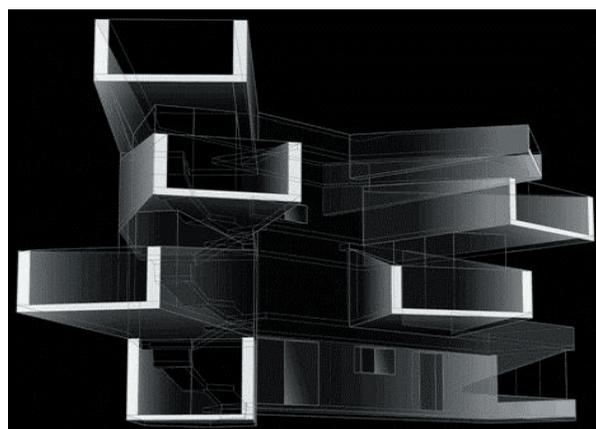


Рис. 4. Отель «Aggrenad», остров Кодже, Южная Корея [3]

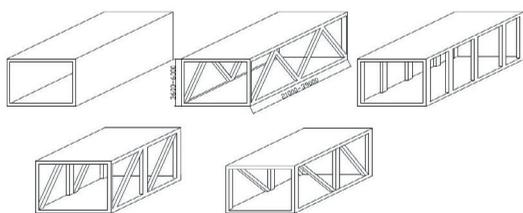


Рис. 5. Варианты балок коробчатого сечения

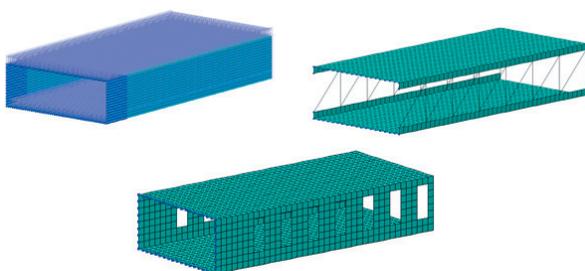


Рис. 6. Варианты расчетных моделей в ЛИРА-САПР для консоли длиной 21 м

Информация о напряженно-деформированном состоянии анализировалась с точки зрения применения тех или иных материалов, а также геометрических характеристик сечений элементов.

При реализации расчетной схемы использовались КЭ 41 (универсальный прямоугольный конечный элемент оболочки) и КЭ 10 (универсальный пространственный стержневой конечный элемент). Сечениям конечных элементов назначались прочностные характеристики бетона класса В40 и арматуры класса А500. Временные нагрузки на конструкции этажа представлены в табл. 1. Постоянные нагрузки от собственного веса конструкций прикладываются автоматически.

Все консольные этажи имеют ширину 9 м и высоту этажа 4 м. В качестве примера рассмотрены два варианта сечений:

- балка коробчатого сечения с перфорированной стенкой;
- ферменная конструкция с развитыми поясами.

По результатам расчета получены следующие значения, представленные в табл. 3 и 4.

Таблица 1

Вид нагрузки	Нормативная нагрузка, кН/м ²	Коэффициент надежности по нагрузке	Расчетная нагрузка, кН/м ²
Снеговая нагрузка $S_0 = c_e \cdot c_t \cdot \mu \cdot S_g = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,6 = 1,6$ кН/м ²	1,6	1,4	2,24
Полезная нагрузка	4	1,2	4,8
Нагрузка от собственного веса. Задается автоматически в ПК ЛИРА-САПР	–	–	–

Таблица 2

Значения моментов и перерезывающих сил для консолей длиной от 21 до 39 м

Длина балки, м	Эпюра M	Макс.знач. M, МНм	Эпюра Q	Макс.знач. Q, МН
21		29,7		2,97
30		66,8		4,46
39		119		5,94

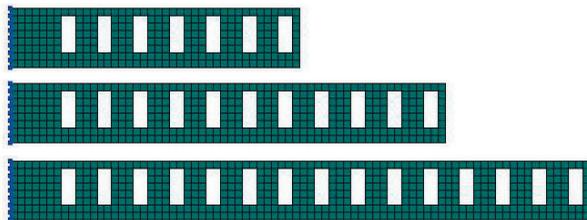


Рис. 7. КЭ модели одноэтажных консолей коробчатого сечения пролетом 21, 30 и 39 м

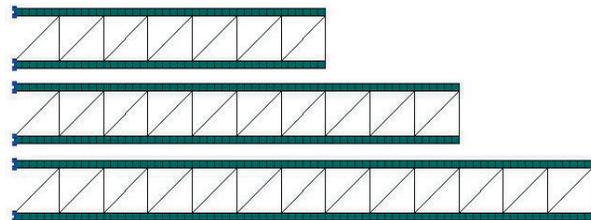


Рис. 8. КЭ модели одноэтажных консолей ферменного типа с развитыми нижним и верхним поясами пролетом 21, 30 и 39 м

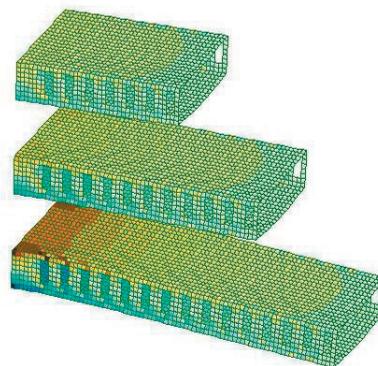


Рис. 9. Мозаика напряжений Nx (МПа) консолей пролетом 21, 30 и 39 м

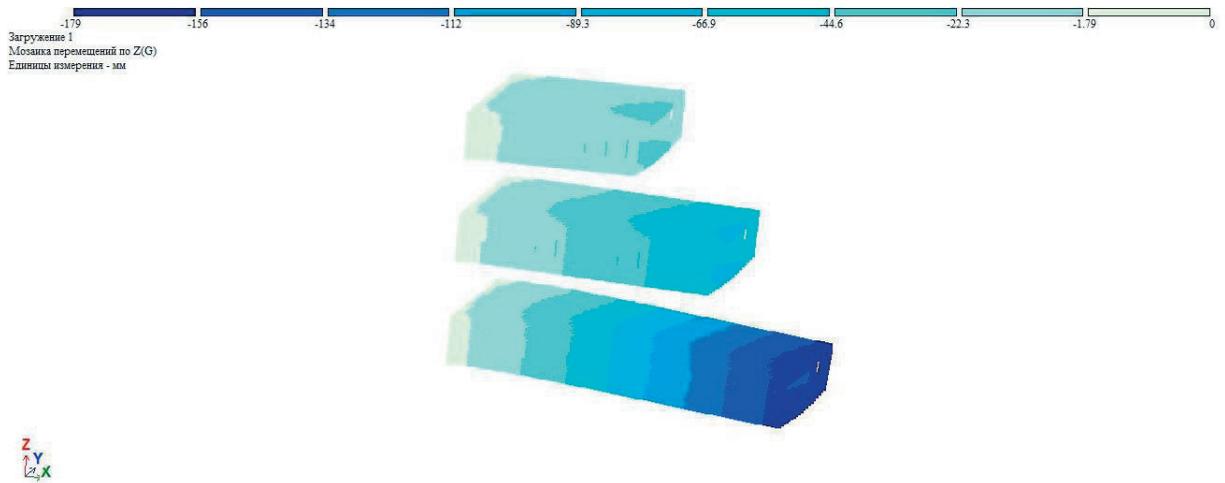


Рис. 10. Мозаика перемещений по оси Z (мм) консолей пролетом 21, 30 и 39 м

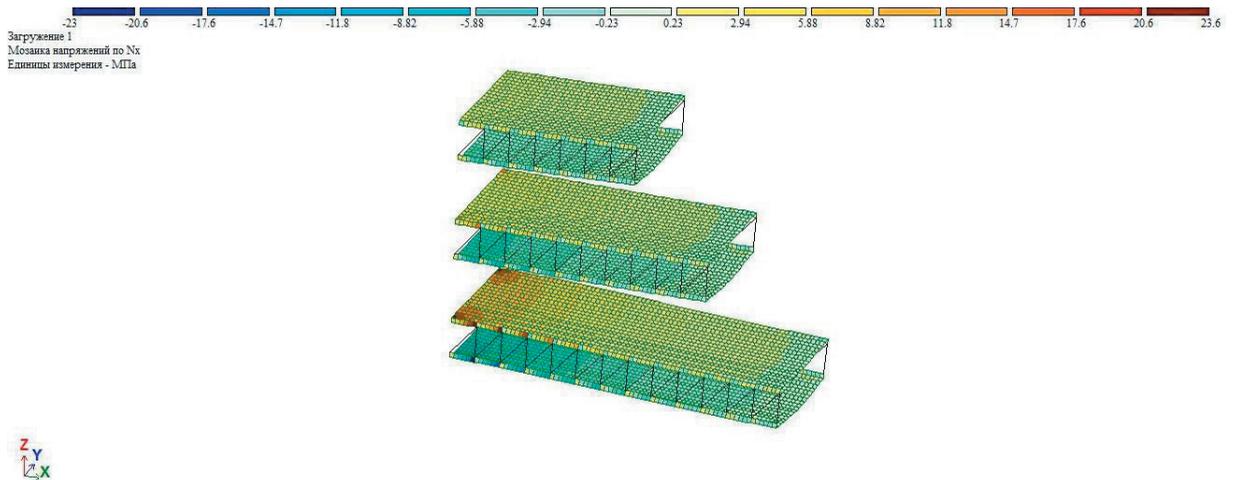


Рис. 11. Мозаика напряжений Nx (МПа) консолей пролетом 21, 30 и 39 м

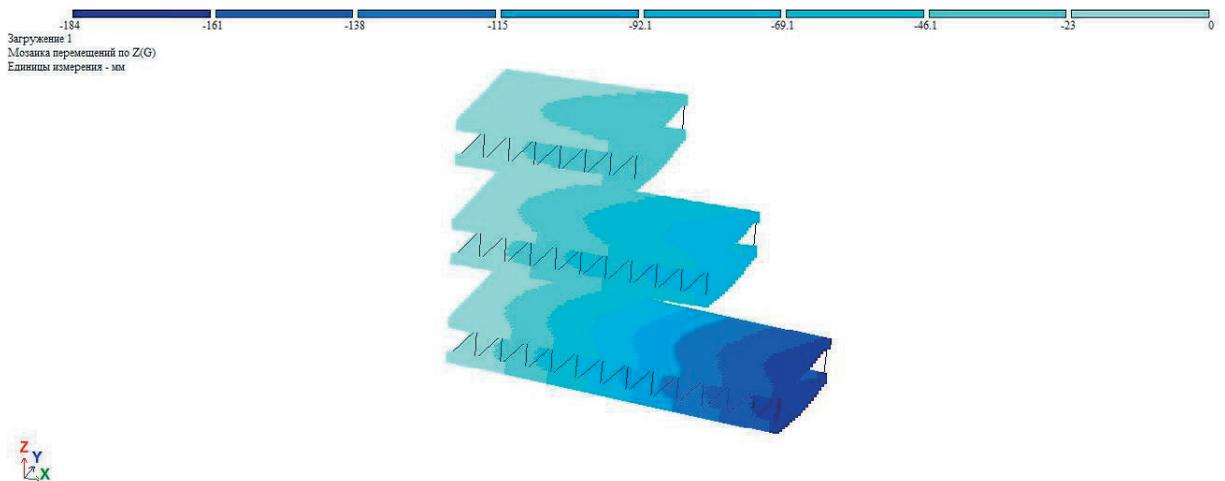


Рис. 12. Мозаика перемещений по оси Z (мм) консолей пролетом 21, 30 и 39 м

Таблица 3

Результаты расчета консоли коробчатого сечения

Пролет, м	Напряжение N_x , МПа	Перемещение по Z, мм	Усилие в стержневых элементах, МПа	Требуемое армирование в плитах, \varnothing / шаг
21	5,81	-30,8	-	\varnothing 25 / 200 мм
30	12,5	-74,6	-	\varnothing 36 / 200 мм
39	21,4	-179	-	\varnothing 40 / 150 мм

Таблица 4

Результаты расчета консоли ферменного типа

Пролет, м	Напряжение N_x , МПа	Перемещение по Z, мм	Усилие в стержневых элементах, МПа	Требуемое армирование в плитах, \varnothing /шаг
21	8,77	- 45,4	-1551 (1000)	\varnothing 28 / 200 мм
30	15,1	- 91,3	-2286 (1518)	\varnothing 36 / 200 мм
39	23,6	- 184	-3026 (2028)	\varnothing 40 / 150 мм

По результатам анализа данных расчета можно сделать следующие **выводы**:

1. Реализация одноэтажных консолей возможна при применении в качестве рациональных сечений коробчатых сечений и ферм с развитыми поясами.

2. Применение коробчатых сечений с перфорированной стенкой в качестве несущей системы для консольного этажа имеет большую жесткость по сравнению с фермой, однако имеет ряд ограничений при реализации объемно-планировочных решений фасада.

3. Уровень напряжений и деформаций в плитных частях консолей находится на пределе прочностных характеристик арматурных сталей, а величина перемещений вдоль действия главных растягивающих напряжений требует применения в данных конструкциях высокопрочных сталей с предварительным напряжением или высокопрочных композитов (углепластиков) с модулем упругости свыше 200 000 МПа [5–7].

4. При реализации стенки в виде ферменной конструкции растянутые элементы рекомендуется выполнять из сталежелезобетона [8].

5. Принятые сечения консолей с развитыми растянутыми и сжатыми полками позволяют рационально распределить усилие по их ширине, однако возникает дополнительная задача по обеспечению устойчивости этих конструкций, в связи с чем возникает необходимость введения балочных элементов в полках или придания выгиба плитной части в поперечном направлении для повышения ее жесткости [9, 10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Штаб-квартира компании GasNatural [Электронный ресурс] URL: <https://archi.ru/projects/world/5024/shtab-kvartira-kompanii-gas-natural> (дата обращения: 19.01.2022).
2. Первый подснежник или уникальное офисное здание для норвежской компании Statoil [Электронный ресурс] URL: <https://apartmentinteriors.ru/statoil/> (дата обращения: 19.01.2022).
3. Aggrenadhotelby AND [Электронный ресурс] URL: <https://www.dezeen.com/2013/01/30/aggrenadhotel-by-and/> (дата обращения: 19.01.2022).
4. Консольные здания и их особенности / А.А. Грузков, В.Д. Матвиенко, П.Е. Соляник, Н.А. Вернин // Инновации и инвестиции. 2020. №10. С. 179–183.
5. Исследование работы железобетонных изгибаемых элементов с применением постнатягаемых канатов / А.А. Пищулев, Д.А. Панфилов, Ю.В. Жильцов, Я.А. Бузовская // Градостроительство и архитектура. 2020 Т. 10, №1. С. 24–29. DOI: /10.17673/Vestnik.2020.01.4.
6. Композитные материалы на основе углеродных волокон при усилении конструкций многоэтажных жилых домов / Р.Ф. Вагапов, В.В. Бабков, Г.С. Колесник, Г.В. Коган, А.Л. Мочалов, М.З. Каранаев, Р.З. Каранаева, Е.Б. Саватеев, И.З. Ахмадиев, И.И. Беркалиев // Жилищное строительство. 2011. №7. С.27–29.
7. Мадатян С.А. Новые технологии и материалы для арматурных работ в монолитном железобетоне // Технологии бетонов. 2006. №3. С. 52–54.
8. Кибирева Ю.А., Астафьева Н.С. Применение конструкций из сталежелезобетона // Экология и строительство. 2018. №2. С.27–34.
9. Оптимизация стержневых систем / А.В. Клюев, С.В. Клюев, Р.В. Лесовик, А.Г. Юрьев // Электрон-

ный научный журнал «Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова». 2008. №3. С.33–36.

10. Пищулев А.А. Изгибаемые железобетонные элементы с неоднородными прочностными характеристиками бетона сжатой зоны // Бетон и железобетон. 2010. №2. С.23–26.

REFERENCES

1. *Shtab-kvartira kompanii GasNatural* [Gas Natural Company Headquarters]. Available at: <https://archi.ru/projects/world/5024/shtab-kvartira-kompanii-gas-natural> (accessed 19 January 2022).

2. *Pervyy podsnegzhnik ili unikal'noe ofisnoe zdanie dlya norvezhskoy kompanii Statoil* [The first snowdrop or a unique office building for the Norwegian company Statoil]. Available at: <https://apartmentinteriors.ru/statoil/> (accessed 19 January 2022).

3. Aggrenadhotelby AND. Available at: <https://www.dezeen.com/2013/01/30/aggrenad-hotel-by-and/> (accessed 19 January 2022).

4. Gruzkov A.A., Matvienko V.D., Solyannik P.E., Vernin N.A. Cantilever buildings and their features. *Innovatsii i investitsii* [Innovation and investment], 2020, no. 10, pp. 179-183. (in Russian)

5. Pishchulev A.A., Panfilov D.A., Zhil'tsov Yu.V., Buzovskaya Ya.A. Research of the work of reinforced concrete bended elements with the use of post-tensioned ropes. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2020, vol. 10, no. 1, pp. 24-29. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.01.4

6. Vagapov R.F., Babkov V.V., Kolesnik G.S., Kogan G.V., Mochalov A.L., Karanaev M.Z., Karanaeva R.Z., Savateev E.B., Akhmadiev I.Z., Berkaliev I.I. Composite materials based on carbon fibers for strengthening the structures of multi-storey residential buildings. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing construction], 2011, no. 7, pp.27-29. (in Russian)

7. Madatyan S.A. New technologies and materials for reinforcement work in monolithic reinforced concrete. *Tekhnologii betonov* [Concrete technologies], 2006, no. 3, pp. 52-54. (in Russian)

8. Kibireva Yu.A., Astaf'eva N.S. Application of steel-reinforced concrete structures. *Ekologiya i stroitel'stvo* [Ecology and construction], 2018, no. 2, pp. 27-34. (in Russian)

9. Klyuev A.V., Klyuev S.V., Lesovik R.V., Yur'ev A.G. Optimization of core systems, *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov], 2008 no. 3, pp.33-36 (in Russian)

10. Pishchulev A.A. Bendable reinforced concrete elements with heterogeneous strength characteristics of compressed zone concrete. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced concrete], 2010, no. 2, pp. 23-26. (in Russian)

Об авторах:

ПИЩУЛЕВ Александр Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных конструкций Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: pishchulev@yandex.ru

МАНЯХИНА Елизавета Олеговна

магистрант кафедры железобетонных конструкций Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: liza_manyakhina@mail.ru

PISHCULEV Alexander A.

PhD in Engineering, Associate Professor of the Reinforced Concrete Structures Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: pishchulev@yandex.ru

MANYAHINA Elizaveta O.

Master's Degree Student of the Reinforced Concrete Structures Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: liza_manyakhina@mail.ru

Для цитирования: Пищулев А.А., Маняхина Е.О. Анализ конструктивных решений для зданий с консольными этажами // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12, № 3. С. 21–27. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.3.

For citation: Pishchulev A.A., Manyakhina E.O. Analysis of Structural Solutions for Buildings with Console Floors. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2022, vol. 12, no. 3, pp. 21–27. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.3.