

А. Н. Плотников, М. Ю. Иванов, О. С. Яковлева

ЖЕСТКОСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИ МОНИТОРИНГЕ

Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы, связанные с соотношением жесткостей горизонтальных и вертикальных элементов высотных зданий. Из учета принципов работы несущих систем таких зданий определены характерные точки перелома кривой упругой вертикальной линии. Проанализирована возможность применения керамзитобетона в перекрытиях с точки зрения влияния их жесткости на деформации всей системы. Для различных конструктивных систем выполнен расчет перемещений от ветровой статической нагрузки с учетом пульсационной составляющей ветровой нагрузки, а также сопоставление компьютерного и ручного расчета. Определены места расположения датчиков автоматического мониторинга.

Ключевые слова: деформация, усилия, жесткость, перемещение, прогиб, перекрытие, бетон, керамзитобетон.

DOI: 10.37972/chgpu.2020.43.1.006

УДК: 624.07:69.032.22:531.79

В последнее время отмечается разнообразие конструктивных систем в строительстве, которое сопровождается повышением сложности и высоты строящихся зданий и сооружений, при этом должны быть обеспечены требования механической безопасности. Общая устойчивость и пространственная жесткость здания зависят от взаимного расположения конструктивных элементов, их прочности и податливости узловых соединений. Сосредоточение большой массы высотного здания приходится на малую часть поверхности основания, что сказывается на чувствительности таких зданий к неравномерным осадкам. В связи с этим возникает вопрос об уменьшении массы зданий [1]. Одним из путей решения проблемы является применение керамзитобетона в перекрытиях [2].

© Плотников А. Н., Иванов М. Ю., Яковлева О. С., 2020

Плотников Алексей Николаевич

e-mail: plotnikovan2010@yandex.ru, кандидат технических наук, доцент, декан, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Иванов Михаил Юрьевич

e-mail: mischa0315@mail.ru, ассистент, аспирант, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Яковлева Ольга Станиславовна

e-mail: konstyktor9@yandex.ru, старший преподаватель, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Поступила 15.01.2020

Во многих научных работах отмечается, что работа различных конструктивных систем высотных зданий имеет общие математические закономерности, которые определяют их деформации, в том числе и от ветровой статической нагрузки [3].

В процессе эксплуатации изменяется состояние зданий: как правило, есть тенденция к ограничению работоспособности и снижению надежности [4, 5]. На практике изменение жесткостных параметров горизонтальных и вертикальных элементов можно проследить с помощью автоматического постоянного мониторинга, ориентированного на применение различных измерительных устройств — инклинометров, тензодатчиков, акселерометров. Эти датчики фиксируют как статические, так и динамические воздействия [6]. Исходя из анализа координатного положения экстремумов функции деформаций вертикальной оси здания, при которых происходит сохранение горизонтальной плоскости перекрытий, определяются основные характерные точки перелома [7].

Жесткость элементов и податливость сопряжений определяют распределение внутренних усилий и их перераспределение при внешних воздействиях. Все эти параметры зависят от их напряженно-деформированного состояния, характеристик используемых материалов и условий эксплуатации [8].

Из-за податливости многочисленных швов и узлов сопряжения элементов жесткость дисков перекрытий и покрытия существенно снижается по сравнению с расчетным идеализированным сплошным монолитным перекрытием. Это снижение допускается учитывать путем введения пониженного значения начального модуля упругости бетона при постоянном соотношении между приведенными модулями сдвига и упругости и коэффициентами податливости.

Изменение податливости дисков перекрытия влияет на перераспределение усилий между вертикальными элементами (рис. 1). Чем жестче диск и его сопряжения с вертикальными элементами, тем меньшую разность горизонтальных смещений он допускает, а при абсолютно жестких дисках все точки вертикальных конструкций в уровне перекрытий имели бы одинаковые горизонтальные смещения.

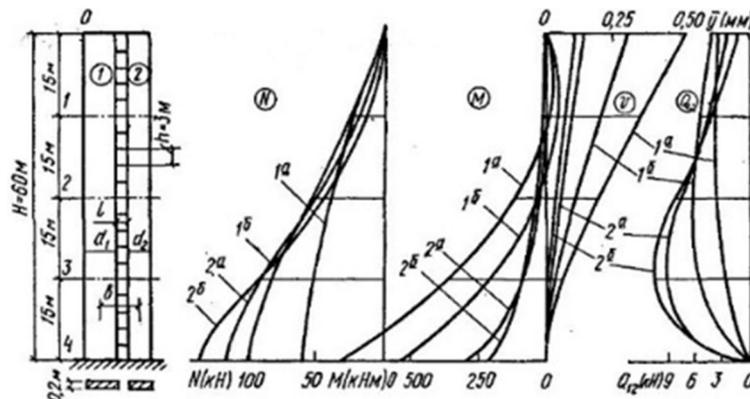


Рис. 1. Распределение деформаций и усилий по высоте здания: эпюры продольных сил N , изгибающих моментов M , поперечных сил Q , прогиб v связевой системы при соотношениях приведенных жесткостных характеристик между отдельными вертикальными элементами

Деформации зависят от соотношения жесткости вертикальных и горизонтальных элементов каркаса (рис. 2). Характерные точки перелома находятся через 1/4 высоты здания [8].

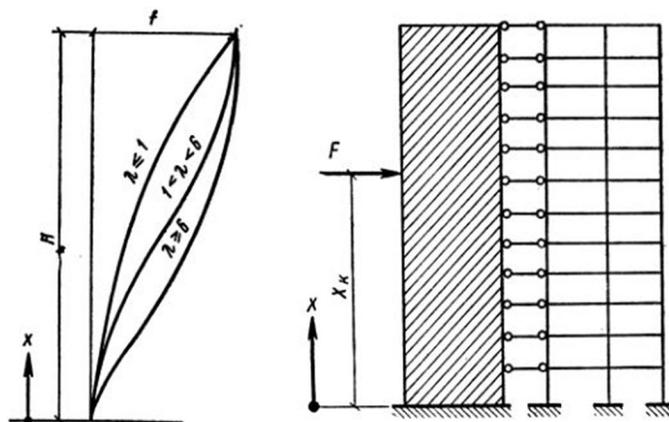


Рис. 2. Распределение деформаций по высоте здания в зависимости от жесткости вертикальных элементов (λ — характеристика жесткости вертикальных диафрагменных элементов (ядра), при значении менее 1 — более жесткие вертикальные элементы, более 6 — более гибкие)

В здании перекрытия являются связями сдвига, обладающие реальной жесткостью и зависящие от конструктивного исполнения. Они препятствуют свободному изгибу вертикальных элементов жесткости. В связи с этим линия деформаций вертикальных элементов жесткости становится S-образной, т.е. имеет две кривизны в плоскости, в пространстве, соответственно, четыре (рис. 3).

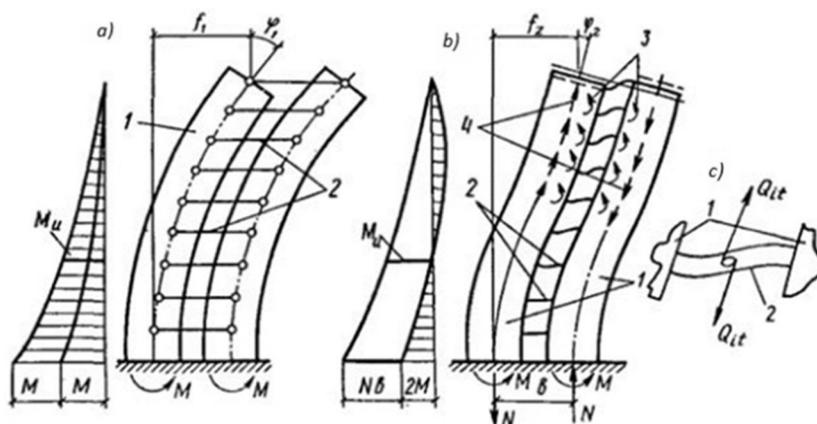


Рис. 3. Схема работы связей сдвига: *a* — шарнирных (крайне теоретических); *b* — реальных (с промежуточной жесткостью); *c* — деталь деформирования связи (перекрытия) (1 — столбы (диафрагмы, ядра жесткости); 2 — связи (перекрытия); 3 — изгибающие моменты; 4 — поперечные силы Q_i , передаваемые на столбы жесткости)

Основные формулы для определения прогибов получены П. Ф. Дроздовым [7].

Горизонтальное перемещение (прогиб) в любом сечении несущей системы или конструкции в принятой системе координат равно

$$v(x) = \int_x^H \alpha dx = v_s(x) + \frac{nB_a}{\lambda^2 B_u \sum B} \times \\ \times \left\{ q \left[\operatorname{ch} \lambda H - \operatorname{ch} \lambda x + \beta (\operatorname{sh} \lambda H - \operatorname{sh} \lambda x) + (1-a) \left(1 - \frac{x}{H} \right) \right] \lambda^{-2} + \right. \\ \left. + M_h(H) - M_h(x) \right\}, \quad (1)$$

где $v_s(x)$ — прогиб в сечении x несущей системы или конструкции с абсолютно жесткими перемычками или ригелями, равный для нагрузки, распределенной по закону трапеции,

$$v_s(x) = -\frac{qH^4}{120B_u} \left[4a + 11 + (a-1) \left(\frac{x}{H} \right)^5 + 5 \left(\frac{x}{H} \right)^4 - 5(3+a) \frac{x}{H} \right]; \quad (2)$$

M_h — изгибающий момент при трапециевидной эпюре горизонтальной нагрузки:

$$M_h = -\frac{(a+2)qH^2}{6}. \quad (3)$$

Находим первую производную линии прогибов, дифференцируя (1) и подставляя (2) и (3):

$$v'(x) = \frac{H^4 q}{120B_u} \left[\frac{20x^3}{H^4} - \frac{5a+15}{H} + \frac{5x^4(a-1)}{H^5} \right] - \frac{B_a n}{\sum B \cdot B_u \lambda^2} \times \\ \times \left[\frac{q \left[\operatorname{ch} \lambda x - \operatorname{ch} \lambda H + \beta (\operatorname{sh} \lambda x - \operatorname{sh} \lambda H) - (a-1) \left(\frac{x}{H} - 1 \right) \right]}{\lambda^2} - \right. \\ \left. - \frac{qx^2(a+2)}{6} + \frac{H^2 q(a+2)}{6} \right]. \quad (4)$$

Находим координаты экстремумов линии прогибов, приравнивая функцию производной к нулю:

$$v'(x) = 0. \quad (5)$$

На основе этих формул был выполнен ручной расчет горизонтальных перемещений конструкции для различных конструктивных систем зданий, которые были смоделированы в программных комплексах Лира САПР и SCAD [9]. Расчетные модели всех зданий представлены на рис. 4.

Для прослеживания влияния изменений жесткостных параметров горизонтальных и вертикальных элементов сравним деформации зданий от ветровой статической нагрузки с применением в плитах перекрытия обычного тяжелого бетона и керамзитобетона [10, 11, 12]. Результаты расчета представлены в табл. 1, 2 и на рис. 5–10.

При сопоставлении прогибов вертикальных осей зданий плит перекрытий из тяжелого бетона В30 и керамзитобетона В30 при компьютерном расчете отличаются на 0,002 доли, т.е. на 2%, при ручном расчете — до 3 раз, а при сопоставлении прогибов вертикальных осей зданий в уровне перекрытий при ручном и компьютерном расчетах перемещения отличаются, по некоторым схемам, до 10 раз. Компьютерные расчетные

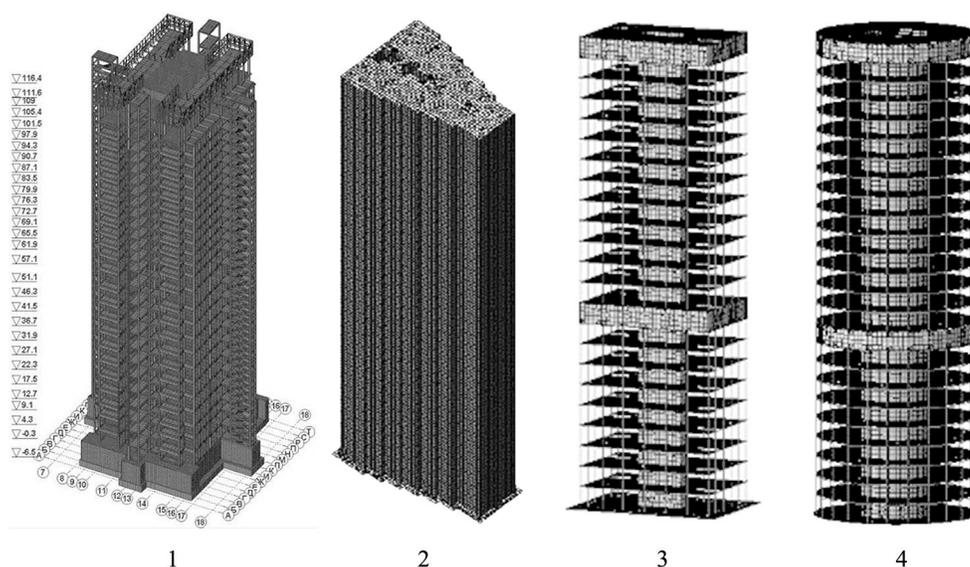


Рис. 4. Расчетные модели в ПК SCAD и Лира САПР: *здание 1* — с рамно-связевым каркасом, с монолитным железобетонным ядром жесткости; высота 118,75 м; 26 этажей; размещение: г. Москва, пр. Вернадского, стр. 10; датчики размещены на 1, 7, 13, 20, 26 этажах; *здание 2* — с перекрестно-стеновой конструктивной системой; высота 136,81 м; 44 этажа; размещение: Московская обл., г. Красногорск, Павшино; датчики размещены на 1, 11, 22, 33, 44 этажах; *здание 3* — коробчато-ствольной конструктивной системы с аутригерными этажами; высота 103,5 м; 23 этажа; проектируемое здание; датчики размещены на 1, 6, 12, 18, 23 этажах; *здание 4* — оболочковой конструктивной системы с аутригерными этажами; высота 100 м; 25 этажей; проектируемое здание; датчики размещены на 1, 6, 12, 18, 25 этажах.

Таблица 1. Результаты расчета перемещений v_x для бетона В30

Сечение	x/H	Рамно-связевый каркас		Перекрестно-стеновая система		Коробчато-ствольная система		Оболочковая система	
		ручн.	комп.	ручн.	комп.	ручн.	комп.	ручн.	комп.
0	0	0,012	0,030	0,136	0,004	0,323	0,044	0,250	0,017
1	1/4	0,008	0,025	0,105	0,003	0,249	0,034	0,181	0,011
2	1/2	0,004	0,017	0,072	0,002	0,170	0,021	0,125	0,006
3	3/4	0,001	0,009	0,022	0,001	0,083	0,009	0,065	0,002
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0

модели были построены по традиционным методам — без связей конечной переменной жесткости между перекрытиями и вертикальными элементами конструкции.

По данным П. Ф. Дроздова прослеживается снижение жесткости связей при эксплуатации зданий. Во всех случаях деформации зависят от соотношения жесткости вертикальных и горизонтальных элементов каркаса. Компьютерный расчет наглядно показывает точки экстремумов по высоте здания, когда происходит наклон касательной к линии изгиба. По результатам расчетной модели определено, что линия деформаций здания по вертикали имеет нелинейный характер, что полностью соответствует общей

Таблица 2. Результаты расчета перемещений v_x для керамзитобетона В30

Сечение	x/H	Рамно-связевый каркас		Перекрестно-стенная система		Коробчато-ствольная система		Оболочковая система	
		ручн.	комп.	ручн.	комп.	ручн.	комп.	ручн.	комп.
0	0	0,013	0,030	0,420	0,0048	0,923	0,046	0,663	0,018
1	1/4	0,009	0,025	0,320	0,0031	0,701	0,036	0,505	0,012
2	1/2	0,005	0,017	0,214	0,0017	0,461	0,022	0,343	0,007
3	3/4	0,001	0,009	0,085	0,0006	0,179	0,009	0,176	0,002
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0

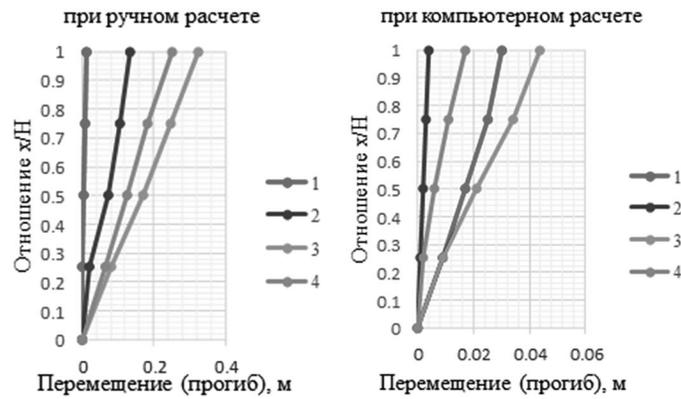


Рис. 5. Сопоставление графиков прогибов бетона В30

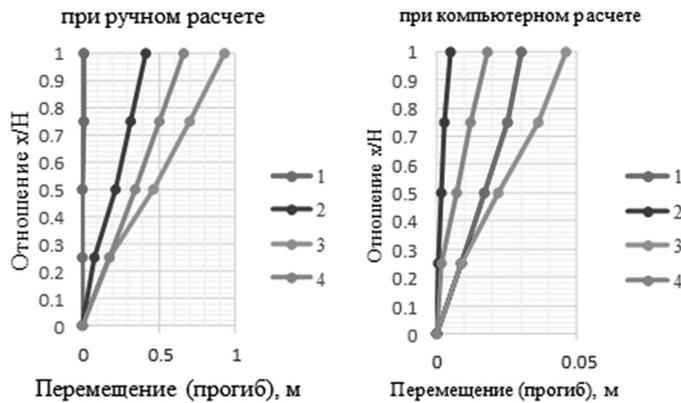


Рис. 6. Сопоставление графиков прогибов керамзитобетона В30

теории расчета высотных зданий с каркасом связевого типа. Это хорошо согласуется с общей теорией связевых каркасов с ядром жесткости. При данном соотношении жесткости вертикальных и горизонтальных элементов каркаса характерные точки

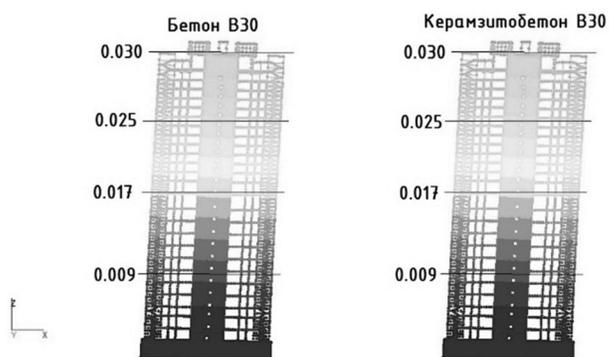


Рис. 7. Сопоставление перемещений от ветровой статической нагрузки для рамно-связевого каркаса

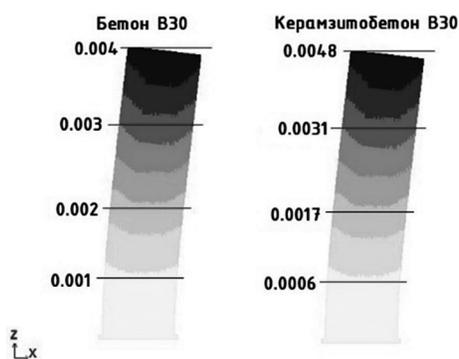


Рис. 8. Сопоставление перемещений от ветровой статической нагрузки для перекрестно-стенной системы

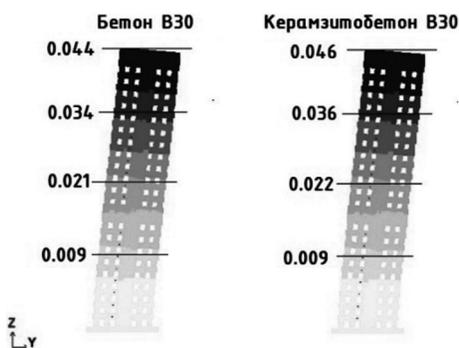


Рис. 9. Сопоставление перемещений от ветровой статической нагрузки для корбчато-ствольной системы

перелома находятся через $1/4$ высоты здания, при крайних соотношениях жесткости (более жесткие перекрытия) эти точки могут смещаться несколько ниже.

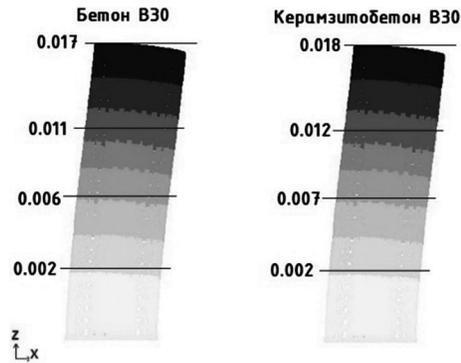


Рис. 10. Сопоставление перемещений от ветровой статической нагрузки для оболочковой системы

Для регистрации влияния жесткостных параметров применены различные измерительные устройства — инклинометры, тензометры, акселерометры.

Отклонения от вертикали регистрируют в колоннах под перекрытиями для предотвращения крена (допустимые значения $1/500 H$). Для измерения крена здания минимальное количество инклинометров составило 5 на каждой отметке, которые расположены через каждую $1/4$ высоты здания. Расстановка приборов производится на ядре жесткости и по углам здания.

Для измерения частоты, амплитуды и ускорений движения элементов конструкций с учетом затухания волны рекомендуются зоны, расположенные через каждые $1/4$ его высоты. Минимальное количество акселерометров для измерения ускорения здания, расположенных на $1/4$ и $1/2$ высоты здания, составило по одному акселерометру, а для $3/4$ и 1 принято 3.

Максимальные усилия в колоннах, в стенах, в ядре жесткости возникают в пределах нижнего этажа. Вследствие этого тензометры располагаются на первых этажах. Минимальное количество тензометров для измерения деформаций составляет 12, по углам зданий 8, а на ядре жесткости 4.

Из общей теории расчета высотных зданий и компьютерной расчетной модели характерные точки перелома находятся через $1/4$ высоты здания. Изменение соотношения жесткостных параметров вертикальных и горизонтальных элементов каркаса влияет на различные деформации здания в целом. При определении вертикальных перемещений следует обратить внимание на жесткостные параметры, которые определяют общую устойчивость и пространственную неизменяемость.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Плотников А. Н., Иванов М. Ю., Порфирьева Е. Н. Информативность систем мониторинга высотных зданий из принципа минимизации количества датчиков // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: мат. IV Междунар. (X Всеросс.) конф. НАСКР-2018. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. С. 267–277.
- [2] Порфирьева Е. Н., Иванов М. Ю., Плотников А. Н. Методы предельного равновесия и главных напряжений для опертых по контуру перекрытий из конструкционного керамзитобетона // Строительство — формирование среды жизнедеятельности: сб. мат. семинара “Молодежные инновации” XXI Междунар. научн. конф. 2018. С. 276–282.

- [3] Иванов М. Ю., Порфирьева Е. Н., Плотников А. Н. Необходимые зоны контроля параметров высотных зданий, определяемые из характера кривизны упругой линии вертикальных элементов // Юность Большой Волги: сб. статей лауреатов XX Межрегион. конф.-фестиваля научн. творчества учащейся молодежи. 2018. С. 111–114.
- [4] Николаева А. Г., Яковлева О. С. Анализ влияния последовательности нагружения на напряженно-деформированное состояние элементов каркасов многоэтажных зданий // Управление ассортиментом, качеством и конкурентоспособностью в глобальной экономике: сб. статей VIII Междунар. заочной науч.-практ. конф. (30 марта 2017 г.). Чебоксары: ЧКИ РУК, 2016. С. 131–134.
- [5] Иванова Н. В., Николаева А. Г. Влияние процента армирования на НДС элементов рамных каркасов многоэтажных зданий при расчете с учетом возведения // Современные вопросы механики сплошных сред — 2017: сб. статей по мат. конф. (круглого стола) с междунар. участием. Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 2017. С. 38–42.
- [6] Тамразян А. Г., Мехрализадех Б. А. Частота свободных колебаний многоэтажных зданий при расчете на прогрессирующее обрушение в нелинейной динамической постановке учетом времени локального повреждения // Современные проблемы расчета и проектирования железобетонных конструкций многоэтажных зданий: сб. докл. Междунар. научн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения П. Ф. Дроздова. Москва: МГСУ, 2013. С. 235–245.
- [7] Дроздов П. Ф. Конструирование и расчет несущих систем многоэтажных зданий и их элементов: учебное пособие для вузов: 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Стройиздат, 1977. 223 с.
- [8] Дроздов П. Ф. [и др.]. Проектирование и расчет многоэтажных гражданских зданий и их элементов: учебное пособие для вузов / под ред. П. Ф. Дроздова. Москва: Стройиздат, 1986. 351 с.
- [9] Алмазов В. О., Климов А. Н. Сопоставление данных системы мониторинга высотных зданий с расчетом в программном комплексе // Современные проблемы расчета и проектирования железобетонных конструкций многоэтажных зданий: сб. докл. Междунар. научн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения П. Ф. Дроздова. Москва: МГСУ, 2013. С. 38–44.
- [10] Иванов М. Ю., Порфирьева Е. Н., Плотников А. Н. Методы предельного равновесия и главных напряжений для опертых по контуру плит перекрытий // Инженерные кадры — будущее инновационной экономики России. 2017. № 5. С. 36–37.
- [11] Иванов М. Ю., Порфирьева Е. Н., Плотников А. Н. Испытание нагружением плит перекрытия из керамзитобетона, опертой по контуру // Научному прогрессу — творчество молодых. 2017. № 4. С. 24–26.
- [12] Плотников А. Н., Гафиятуллин Н. А., Васильев П. А. Несущая способность наружных стеновых панелей из конструкционного керамзитобетона со стальной и композитной арматурой // Жилищное строительство. 2017. № 3. С. 52–57.

A. N. Plotnikov, M. Yu. Ivanov, O. S. Yakovleva

RIGID ALTITUDE BUILDING PARAMETERS AND THEIR DETERMINATION DURING MONITORING

Chuvash State University named after I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia

Abstract. The article discusses issues related to the ratio of the stiffnesses of horizontal and vertical elements of high-rise buildings. Based on the principles of operation of the load-bearing systems of such buildings, the characteristic fracture points of the elastic vertical line curve are determined. The possibility of using expanded clay in floors is analyzed from the point of view of the influence of their rigidity on the deformation of the entire system. For various structural systems, displacements from the static wind load were calculated taking into account the pulsating component of the wind load, as well as a comparison of computer and manual calculations. The locations of automatic monitoring sensors are determined.

Keywords: deformation, effort, rigidity, displacement, deflection, overlap, concrete, expanded clay.

REFERENCES

- [1] Plotnikov A. N., Ivanov M. Y., Porfiryeva E. N. Informativeness of high-rise buildings monitoring systems from the principle of minimizing the number of sensors // New in architecture, design of building structures and reconstruction: materials of the IV International (X All-Russian) NASKR-2018 Conference. Cheboksary: Publishing house of Chuvash. University, 2018. P. 267–277. (in Russian).
- [2] Porfiryeva E. N., Ivanov M. Y., Plotnikov A. N. Methods of ultimate equilibrium and principal stresses for floor-supported ceilings made of structural expanded clay concrete floors // Construction — shaping the living environment of the XXI International Scientific Conference: collection of materials from the seminar “Youth Innovations”. 2018. P. 276–282. (in Russian).
- [3] Ivanov M. Y., Porfiryeva E. N., Plotnikov A. N. Necessary zones for controlling the parameters of high-rise buildings, determined from the nature of the curvature of the elastic line of vertical elements // Bolga Volga Youth: Collection of articles by winners of the 20th Interregional Conference and Festival of Scientific Creativity of Students. 2018. P. 111–114. (in Russian).
- [4] Nikolaeva A. G., Yakovleva O. S. Analysis of the effect of loading sequences on the stress-strain state of frame elements of multi-storey buildings // Assortment, quality and competitiveness management in the global economy: Sat. Articles VIII Int. correspondence scientific and practical conf. (March 30, 2017). Cheboksary: ChKI RUK, 2016. P. 131–134. (in Russian).
- [5] Ivanova N. V., Nikolaeva A. G. The influence of the percentage of reinforcement on the VAT of the frame elements of multi-storey buildings in the calculation taking into account the construction // Modern issues in the mechanics of continuous media — 2017: Sat. Art. by mat. conf. (round table) with Int. participation. Cheboksary: Chuvash State University, 2017. P. 38–42. (in Russian).
- [6] Tamrazyan A. G., Mehralizadeh B. A. The frequency of free vibrations of multi-storey buildings when calculating for progressive collapse in a nonlinear dynamic setting taking into account the local damage time // Modern problems of calculation and design of reinforced concrete structures of multi-storey buildings: Sat. doc. Int. scientific Conf. 100th anniversary of the birth of P. F. Drozdova. Moscow: MGSU, 2013. P. 235–245. (in Russian).

Plotnikov Alexey Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean, Chuvash State University named after I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia.

Ivanov Mikhail Yuryevich, Assistant, Postgraduate Student, Chuvash State University named after I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia.

Yakovleva Olga Stanislavovna, Senior Lecturer, Chuvash State University named after I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia.

-
- [7] Drozdov P. F. Design and calculation of load-bearing systems of multi-storey buildings and their elements: a textbook for universities: 2nd ed., revised. and add. Moscow: Stroyizdat, 1977. 223 p. (in Russian).
- [8] Drozdov P. F. [et al]. Design and calculation of multi-story civil buildings and their elements: a textbook for universities / Ed. by P. F. Drozdov. Moscow: Stroyizdat, 1986. 351 p. (in Russian).
- [9] Almazov V. O., Klimov A. N. Comparison of the data of the monitoring system of high-rise buildings with the calculation in the software package // Modern problems of calculation and design of reinforced concrete structures of multi-storey buildings: Sat. doc. Int. scientific conf. 100th anniversary of the birth of P. F. Drozdova. Moscow: MGSU, 2013. P. 38–44. (in Russian).
- [10] Ivanov M. Y., Porfiryeva E. N., Plotnikov A. N. Methods of extreme equilibrium and principal stresses for floor slabs supported along the contour // Engineering personnel — the future of the innovative Russian economy. 2017. no. 5. P. 36–37. (in Russian).
- [11] Ivanov M. Y., Porfiryeva E. N., Plotnikov A. N. Loading test of floor slabs made of expanded clay concrete, supported along the contour // Scientific progress — creativity of young people. 2017. no. 4. P. 24–26. (in Russian).
- [12] Plotnikov A. N., Gafiyatulin N. A., Vasiliev P. A. Bearing capacity of exterior wall panels of structural expanded clay with steel and composite reinforcement // Housing construction. 2017. no. 3. P. 52–57. (in Russian).