

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.367-376

Аналитический метод определения напряженно-деформированного состояния модульных зданий

Вячеслав Сергеевич Широков¹, Татьяна Александровна Белаш²,
Татьяна Евгеньевна Гордеева¹

¹ Самарский государственный технический университет (СамГТУ); г. Самара, Россия;

² НИЦ «Строительство»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Активное внедрение модульных зданий в практику современного строительства вызывает необходимость развития методов их расчета. Однако отсутствуют какие-либо специализированные руководства по проектированию модульных зданий. При разработке рекомендаций проектирования невозможно обойтись только численными методами расчета. Поэтому создание аналитического метода расчета модульных зданий — актуальное направление исследований. Рассматривается вопрос определения усилий в элементах модульных зданий с несущими колоннами и жесткими внутримодульными соединениями.

Материалы и методы. Определение усилий в элементах модульных зданий от вертикальных нагрузок с высокой точностью можно проводить с помощью известных выражений строительной механики. Главной трудностью является установление динамических воздействий (пульсация ветра и сейсмика). Предлагается использовать консольную схему сооружения с разложением масс в уровне перекрытий. В результате вычислений образуется набор инерционных сил от пульсации и сейсмического воздействия. Для большего упрощения вычислений написана программа Modular. Программа удобна для проведения предварительных и вариантных расчетов и исследований конструкций модульных зданий.

Результаты. Представленный аналитический метод определения усилий в элементах модульных зданий показывает хорошую сходимость результатов с методом конечных элементов. На конкретном примере показано, что расхождение в определении усилий от вертикальных нагрузок практически отсутствует. Расхождение от суммарного воздействия статической и пульсационной составляющих составляет 4,2–16,6 % для изгибающих моментов и 1,3–6 % для продольных сил. Погрешность определения усилий от сейсмического воздействия укладывается в интервал 5–10 % как для изгибающих моментов, так и для продольных сил.

Выводы. Метод удобен для применения на стадии качественной оценки проектных решений, вариантных расчетов и поиска рациональных конструктивных решений модульных зданий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: модульные здания, частота собственных колебаний, методы расчета, нагрузки, усилия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Широков В.С., Белаш Т.А., Гордеева Т.Е. Аналитический метод определения напряженно-деформированного состояния модульных зданий // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 367–376. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.367-376

Автор, ответственный за переписку: Вячеслав Сергеевич Широков, ShirokovViacheslav@gmail.com.

Analytical method for determining the stress-strain state of modular buildings

Viacheslav S. Shirokov¹, Tatyana A. Belash², Tatyana E. Gordeeva¹

¹ Samara State Technical University (SamGTU); Samara, Russian Federation;

² Research Center "Construction"; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Active introduction of modular buildings into the practice of modern construction causes the necessity to develop methods of their calculation. At the same time, there are no specialized guidelines for the design of modular buildings. It is impossible to manage only with numerical methods of calculation for forming design recommendations. Therefore, the creation of an analytical method of calculation of modular buildings is an important area of research. The question of determination of forces in elements of modular buildings with bearing columns and rigid intramodular connections is considered.

Materials and methods. The determination of forces in the elements of modular buildings from vertical loads can be carried out with high accuracy using well-known formulas of building mechanics. The main difficulty is the determination of dynamic effects (wind pulsation and seismic load). It is proposed to use a cantilever construction scheme with the decomposition of masses at the floor level. As a result of calculations, a set of inertial forces is formed from pulsation and seismic action. Modular programme was written to simplify the calculations. The programme is convenient for making preliminary and variant calculations and research of modular building structures.

Results. The presented analytical method for determining the forces in the elements of modular buildings shows good

convergence of the results with the finite element method. On a concrete example, it is shown that there is practically no discrepancy in determination of forces from vertical loads. The discrepancy from the combined effect of the static and pulsation components is 4.2–16.6 % for bending moments and 1.3–6 % for longitudinal forces. The discrepancy in determining the forces from the seismic load is within the range of 5–10 % for both bending moments and longitudinal forces.

Conclusions. The method is convenient for application at the stage of qualitative assessment of design solutions, variant calculations and search for rational design solutions of modular buildings.

KEYWORDS: modular buildings, natural vibration frequency, calculation methods, loads, internal forces

FOR CITATION: Shirokov V.S., Belash T.A., Gordееva T.E. Analytical method for determining the stress-strain state of modular buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):367-376. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.367-376 (rus.).

Corresponding author: Viacheslav S. Shirokov, ShirokovViacheslav@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Активное внедрение модульных зданий в практику современного строительства [1–7] вызывает необходимость развития методов их расчета. Главным инструментом расчета строительных конструкций служат программные комплексы (ПК), основанные на методе конечных элементов (МКЭ). Однако при поиске рациональных конструктивных решений зданий и оценке качества принятых предпроектных решений этот метод является довольно трудоемким, так как требует составления большого числа расчетных схем.

Для модульных зданий в силу их особенностей необходима тщательная проработка на стадии проектирования [8]. В работах [9–11] на базе анализа модульного строительства в Сингапуре приводятся ключевые направления для формирования руководства по проектированию. Отечественные авторы также отмечают, что в настоящее время имеется потребность в совершенствовании нормативной базы проектирования модульных зданий [2]. При разработке рекомендаций проектирования невозможно обойтись только численными методами расчета. Поэтому создание аналитического метода расчета модульных зданий — актуальное направление исследований.

В данной работе рассматривается вопрос определения усилий в элементах модульных зданий с несущими колоннами и жесткими внутримодульными соединениями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Каркас модуля с несущими колоннами состоит из стоек, расположенных по углам, и двух горизонтальных рам (нижней и верхней). Вертикальные нагрузки действуют на балки настила и передаются на горизонтальные ригели. Поперечные нагрузки воспринимаются колоннами. Расчетная схема модульного блока представлена на рис. 1.

Определение усилий в элементах модульного здания от статических нагрузок (собственный вес, снеговая и полезная нагрузки) можно осуществлять с помощью известных аналитических решений, приведенных, например, в «Справочнике по сопротивлению материалов» под редакцией Г.С. Писаренко, расхождение с результатами по МКЭ практически отсутствует. Более сложный вопрос — определение усилий от динамических воздействий (пульсация

ветра, сейсмика). Основной характеристикой для установления таких воздействий является частота собственных колебаний зданий. Вопрос выявления частот собственных колебаний исследовался различными авторами [12–17].

В работе [17] проведено сопоставление результатов определения собственных частот колебаний разных авторов с упрощенной формулой для вычисления первой частоты, представленной в австралийских нормах. Согласно полученным сведениям для модульных зданий, упрощенная формула справедлива далеко не во всех случаях.

Соавтором настоящей статьи В.С. Широковым в трудах [18, 19] показано, что для стальных зданий из составленных модулей с несущими колоннами и жесткими внутримодульными соединениями при расчете колебаний здания можно рассматривать плоскую вертикальную раму одного модуля. Первая собственная частота колебаний с высокой точностью вычисляется следующим образом:

f = 1 / (2 * pi * sqrt(c^2 * G * h^3 * (1 + (I1 * l2) / (I2 * h)))) (1)

где E — модуль упругости стали; I1 — момент инерции колоны; g — ускорение свободного падения;

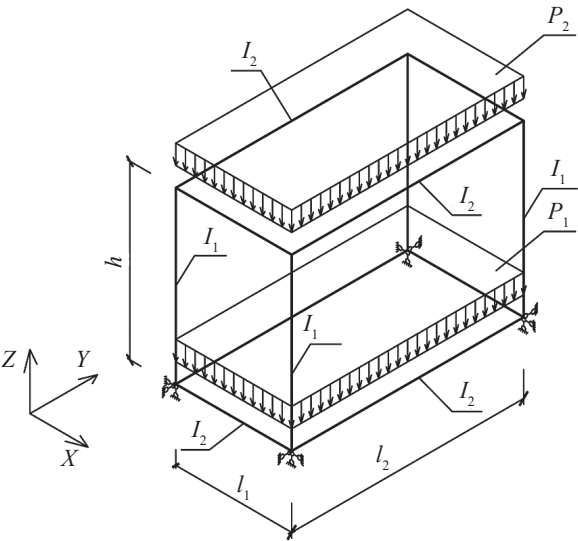


Рис. 1. Расчетная схема одного блока
Fig. 1. Modular block design scheme

c — количество этажей здания; G — масса, собранная с перекрытия; h — высота модуля; l_2 — пролет рамы модуля; I_2 — момент инерции ригеля.

Для определения усилий от пульсационного и сейсмического воздействий справедливо использовать консольную схему сооружения с массами, собранными в уровне перекрытий. Тогда инерционные силы от пульсации ветра рассчитываются так:

$$w_i^p = m \cdot \xi_i \cdot \psi_i \cdot y_i, \quad (2)$$

где m — масса сооружения на уровне z , отнесенная к площади поверхности, к которой приложена ветровая нагрузка; ξ_i — коэффициент динамичности, вычисленный для периода собственных колебаний i -й формы, определяется согласно СП 20.13330.2016; ψ_i — коэффициент, определяемый посредством разделения сооружения на r участков, в пределах которых ветровая нагрузка принимается постоянной; y_i — горизонтальное перемещение сооружения на уровне z по i -й форме собственных колебаний:

$$y_j = \frac{(2 \cdot c - 2 \cdot j + 1) \cdot G \cdot h^3}{24 \cdot E \cdot I_1} \cdot \left(1 + \frac{I_1 \cdot l_2}{I_2 \cdot h}\right); \quad (3)$$

$$y_i = \sum_{j=1}^c y_j, \quad (4)$$

где j — порядковый номер яруса снизу вверх.

$$\psi_i = \frac{\sum_{k=1}^r y_{ki} \cdot w_{pk}}{\sum_{k=1}^r y_{ki}^2 \cdot M_k}, \quad (5)$$

где y_{ki} — горизонтальное перемещение центра k -го участка при i -й форме колебаний, принимаются равными y_j по соответствующим ярусам; w_{pk} — равнодействующая пульсационной составляющей ветровой нагрузки на k -й участок сооружения:

$$w_{pk} = w_m \cdot \zeta \cdot v \cdot A_{гр}, \quad (6)$$

где w_m — средняя составляющая ветровой нагрузки, согласно СП 20.13330.2016; ζ — коэффициент пульсации давления ветра, согласно СП 20.13330.2016; v — коэффициент пространственной корреляции ветрового давления, согласно СП 20.13330.2016; $A_{гр}$ — грузовая площадь ветрового давления.

При установлении частот собственных колебаний системы массы модульного здания сосредоточены в уровне перекрытия, поэтому расчетным k -м участком удобно считать половину одного блок-модуля. Полученные по формуле (2) инерционные силы стоит прикладывать в угловых точках блок-модуля. При этом грузовая площадь $A_{гр}$ равна четверти обдуваемой поверхности одного модуля (рис. 2).

Сейсмическая нагрузка для i -й формы колебаний:

$$S_{0ik}^j = m_k^j \cdot A \cdot \beta_i \cdot K_\psi \cdot \eta_{ik}^j, \quad (7)$$

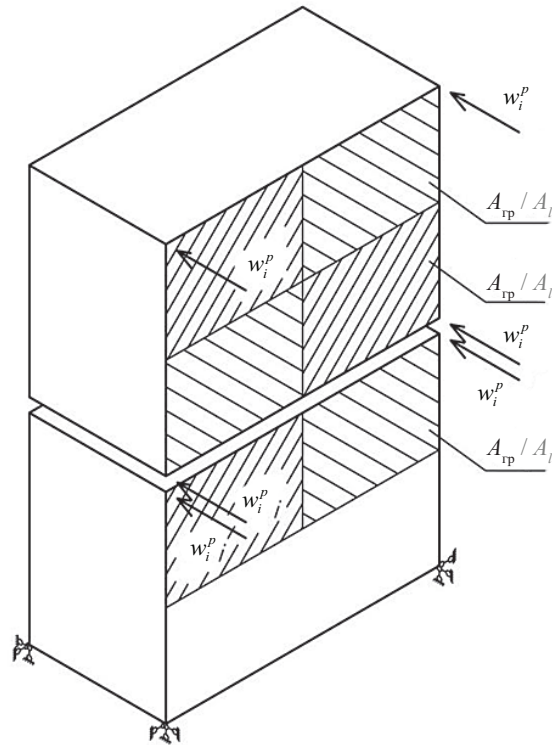


Рис. 2. Грузовые площади к определению инерционных сил
Fig. 2. Load areas for inertial forces

где m_k^j — масса здания, отнесенная к точке k ; A — значение ускорения в зависимости от расчетной сейсмичности согласно СП 14.13330.2018; β_i — коэффициент динамичности, зависящий от категории грунта и периода собственных колебаний, согласно СП 14.13330.2018; K_ψ — коэффициент, учитывающий способность зданий и сооружений к рассеиванию энергии, согласно СП 14.13330.2018; η_{ik}^j — коэффициент, зависящий от формы колебаний здания или сооружения по i -й форме, от узловой точки приложения нагрузки и направления сейсмического воздействия, согласно СП 14.13330.2018.

В результате вычислений образуется набор инерционных сил $P_j = w_i^p$ от пульсации или $P_j = S_{0ik}^j$ от сейсмического воздействия, приложенных в уровне перекрытий (рис. 3). Дальнейшее определение усилий в элементах одного модуля с учетом возможного расположения в плане нескольких модулей производится по следующим формулам:

$$M_{1j} = M_{2j} = M_{3j} = M_{4j} = \sum_j^c \frac{P_j \cdot h}{4 \cdot a}; \quad (8)$$

$$M_{5j} = M_{6j} = 0; \quad (9)$$

$$N_j = -\sum_j^c \frac{2 \cdot (M_{2,c-j} + M_{2,c-1-j})}{l}, \quad (10)$$

где $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6$ — изгибающие моменты в соответствующих расчетных сечениях (рис. 5); j — порядковый номер блока по высоте (снизу вверх);

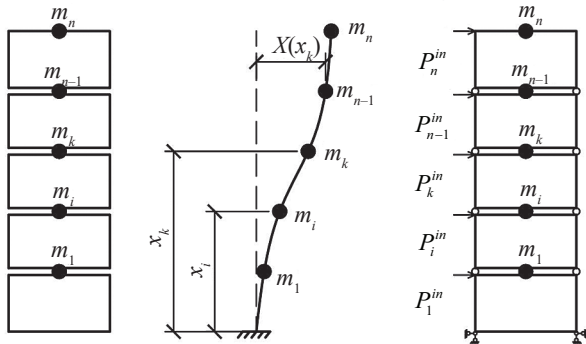


Рис. 3. Схема действия инерционных сил
Fig. 3. Scheme of inertial forces action

c — количество этажей; a — количество блоков в плане в направлении действия нагрузки; N_j — максимальная продольная сила в стойке нижнего модуля; l — пролет модуля в направлении действия нагрузки.

Аналитическое определение усилий является менее трудоемким, чем численное с помощью МКЭ, так как не требует составления расчетной схемы в ПК. Особенно важно это при вариантном проектировании, так как при изменении параметров здания или воздействий в расчетных комплексах приходится значительно изменять схему. Для еще большего упрощения вычислений написана программа Modular. Вычисление усилий с ее помощью занимает пару минут, поэтому она служит удобным инструментом для поиска рациональных конструктивных решений модульных зданий.

Программа Modular написана на языке *c#* и зарегистрирована в реестре программ для ЭВМ (свидетельство № 2019666107 от 04.12.2019). Интерфейс программы (рис. 4) состоит из четырех окон: ввод исходных данных; результаты расчета в на-

правлении Y ; результаты расчета в направлении X ; расчетные сочетания усилий по двум направлениям.

Необходимые исходные данные для расчета:

- генеральные размеры модульного блока (ширина, длина, высота);
- количество модулей по трем направлениям, из которых состоит здание;
- моменты инерции стоек и ригелей;
- нагрузка от собственного веса на нижнюю и верхнюю горизонтальные рамы.

При задании этих сведений будут определены первые частоты собственных колебаний в двух направлениях и усилия от собственного веса. Для установления усилий от других воздействий необходимо ввести дополнительную информацию:

- снеговая и полезная нагрузки;
- ветровой район и тип местности;
- сейсмичность и тип грунта площадки.

Результатом работы программы являются:

- частота и период собственных колебаний по первой форме;
- параметры для определения пульсационного ветрового воздействия (коэффициенты пульсации, динамичности и пространственной корреляции);
- инерционные силы от пульсации в уровне каждого перекрытия;
- параметры для установления сейсмического воздействия (коэффициент динамичности) и инерционные силы от сейсмики в уровне перекрытий;
- изгибающие моменты и продольные силы от действующих нагрузок (собственный вес, снеговая и полезная, статическая составляющая ветра, пульсация, сейсмика).

Все результаты определяются в двух направлениях (продольном и поперечном). Усилия вычисляются для каждого модульного блока по высоте в ше-

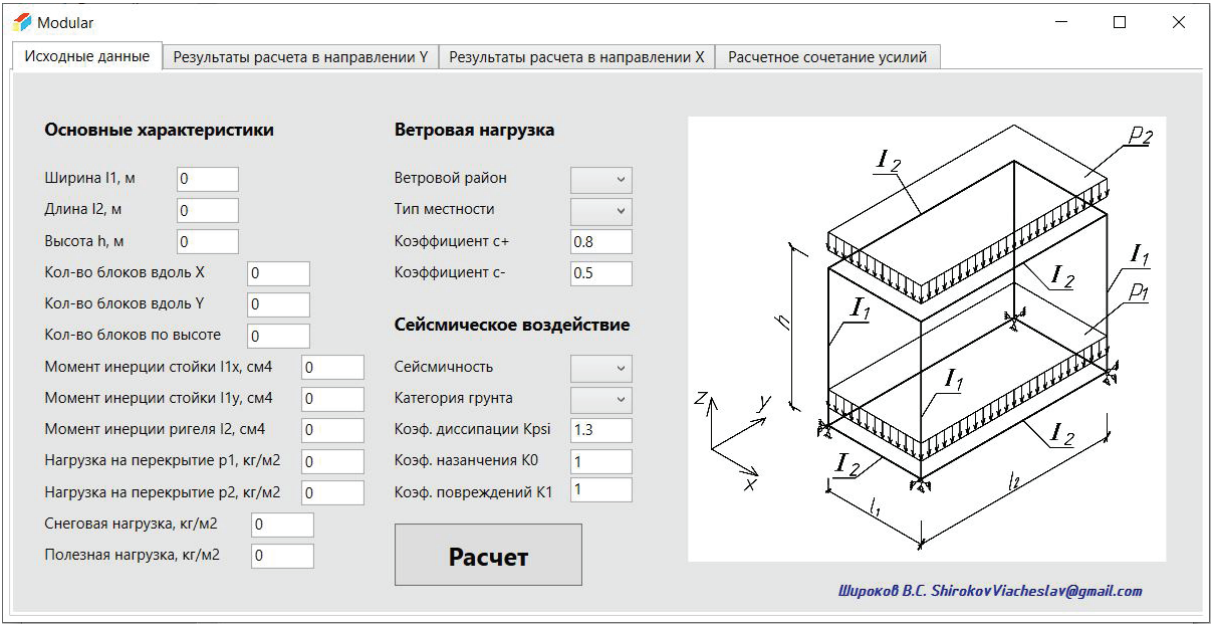


Рис. 4. Окно ввода исходных данных в Modular
Fig. 4. Input data window in Modular

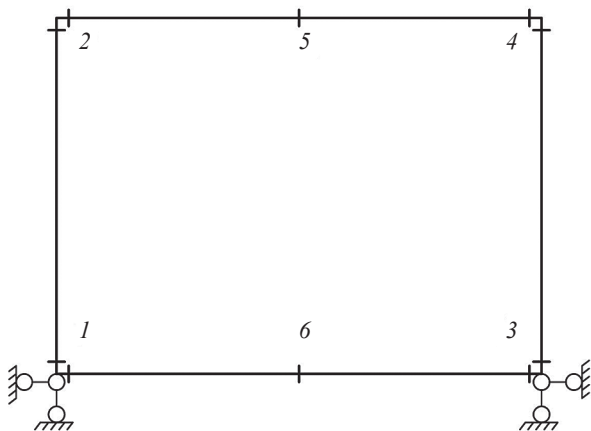


Рис. 5. Расчетные сечения

Fig. 5. Design cross sections

сти расчетных сечениях вертикальной рамы (рис. 5). В последнем окне формируются суммарные усилия по расчетным сечениям согласно сочетаниям нагрузок по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

Ввод данных и получение результатов расчета в Modular занимает пару минут, что намного быстрее составления схемы в расчетном комплексе. При этом пользователь получает не только конечные результаты в виде усилий, но и промежуточные характеристики (частоту, коэффициенты динамичности, инерционные нагрузки и т.п.), что удобно для изучения модульных зданий и влияния их параметров на силовую работу. Таким образом, программа удобна для качественной оценки проекта, проведе-

ния предварительных и вариантных расчетов и исследований конструкций модульных зданий, однако при проектировании следует использовать сертифицированные расчетные комплексы, использующие метод конечных элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Точность определения усилий аналитическим методом в сравнении с МКЭ проверена на примере модульного здания с параметрами, указанными в работе [20]. Колонны и балки выполнены из квадратных труб 150 × 8, моменты инерций $I_1 = I_2 = 1411 \text{ см}^4$. Размеры модуля приняты 3 × 6 × 2,7(н) м, количество блоков в плане: 2 по ширине здания и 3 по длине. Собственный вес перекрытий принят $g = 100 \text{ кг/м}^2$, полезная нагрузка $p = 150 \text{ кг/м}^2$. Ветровые нагрузки соответствуют IV району, тип местности А, снеговой район — V. Сейсмичность принята 8 баллов, тип грунта II.

Для расчета здания методом конечных элементов использовалась Лира-САПР 2016. Расчетная модель представляла собой пространственную стержневую схему. Элементам назначен универсальный пространственный тип (КЭ 10). Колонны и ригели разбивались на 8 конечных элементов для получения более точных картин деформации. Горизонтальная жесткость перекрытий моделировалась стержнями, имеющими тип конечного элемента пространственной фермы (КЭ 4). Сопряжение блок-модулей друг с другом моделировалось объединением перемещений угловых точек по трем

Усилия от вертикальных нагрузок

Internal forces by vertical loads

Нагрузка Load	Усилие Internal force	МКЭ / FEM			Аналитика / Analythics			Δ, %		
		1-этажное 1 storey	2-этажное 2 storey	3-этажное 3 storey	1-этажное 1 storey	2-этажное 2 storey	3-этажное 3 storey	1-этажное 1 storey	2-этажное 2 storey	3-этажное 3 storey
Собственный вес Dead load	$M_1 = M_3, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	−3,90	−3,90	−3,90	−3,90	−3,90	−3,90	0,0	0,0	0,0
	$M_2 = M_4, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	0,0	0,0	0,0
	$M_5, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	0,0	0,0	0,0
	$M_6, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	2,84	0,0	0,0	0,0
	$N_1, \text{ кН} / \text{ kN}$	−4,50	−13,49	−22,49	−4,50	−13,50	−22,50	0,0	0,1	0,0
Снеговая Snow	$M_1 = M_3, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	−0,99	−0,99	−0,99	−1,01	−1,01	−1,01	2,0	2,0	2,0
	$M_2 = M_4, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	8,75	8,75	8,75	8,77	8,77	8,77	0,2	0,2	0,2
	$M_5, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	8,11	8,11	8,11	8,10	8,10	8,10	−0,1	−0,1	−0,1
	$M_6, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$N_1, \text{ кН} / \text{ kN}$	−11,24	−11,24	−11,24	−11,25	−11,25	−11,25	0,1	0,1	0,1
Полезная Imposed load	$M_1 = M_3, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	−5,25	−5,25	−5,25	−5,26	−5,26	−5,26	0,2	0,2	0,2
	$M_2 = M_4, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	0,59	0,59	0,59	0,61	0,61	0,61	3,4	3,4	3,4
	$M_5, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$M_6, \text{ кНм} / \text{ kNm}$	4,86	4,86	4,86	4,86	4,86	4,86	0,0	0,0	0,0
	$N_1, \text{ кН} / \text{ kN}$	0	6,75	13,49	0	6,75	13,50	0	0,0	0,1

линейным направлениям. Вертикальные нагрузки прикладывались на продольные ригели в виде погонной, равномерно распределенной по длине элемента.

Сравнение результатов вычисления усилий произведено для одно-, двух-, трех- и четырехэтажного зданий. Для вертикальных нагрузок усилия определены во всех шести расчетных сечениях. Результаты вычисления усилий от вертикальных нагрузок приведены в таблице. Результаты (табл.) демонстрируют высокую сходимость аналитического и численного методов для вертикальных нагрузок. Также согласно таблице видно, что погрешность вычисления усилий не зависит от количества этажей, поэтому приведены результаты только для одно-, двух- и трехэтажных зданий.

Анализ усилий от поперечных воздействий удобнее проводить с помощью графиков. Наибольшие изгибающие моменты и продольные силы от поперечной нагрузки возникают в опорном сечении крайней стойки нижнего модуля. На рис. 6 показаны изменения изгибающих моментов в расчетном сечении № 1 нижнего модуля; на рис. 7 — изменения продольных сил в расчетном сечении № 1 нижнего модуля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Усилия от вертикальных нагрузок (собственный вес, полезная и снеговая), вычисленные аналитически и методом конечных элементов, показывают высокую сходимость, погрешность не превышает 3,4 % (табл.). Погрешность вычисления уси-

лий от поперечных нагрузок более высокая, чем от вертикальных, что связано с определением инерционных сил от пульсации и сеймики. Наибольшее расхождение наблюдается для усилий от пульсации ветра одно- и двухэтажных зданий: расхождение изгибающих моментов составляет 30 % (рис. 6). В первую очередь это связано с определением коэффициента ψ (формула (5)), точность вычисления которого зависит от количества масс по высоте сооружения. При увеличении этажности погрешность определения усилий от пульсации уменьшается, для четырехэтажного здания составляет 11,1 % для изгибающего момента и 3,2 % для продольной силы. При этом погрешность от суммарного воздействия статической и пульсационной составляющих — 4,2–16,6 % для моментов и 1,3–6 % для продольных сил. Погрешность установления усилий от сейсмического воздействия укладывается в интервал 5–10 % как для изгибающих моментов, так и для продольных сил.

Таким образом, предложенный аналитический метод определения усилий в элементах модульных зданий с вычислением частоты собственных колебаний по формуле (1) имеет достаточную сходимость для предварительных инженерных расчетов и качественной оценки конструктивного решения модульного здания. Главные достоинства метода — более высокая скорость вычислений и прямая связь между усилиями в элементах модулей и их геометрическими характеристиками. Поэтому с точки зрения проведения исследования напряженно-де-

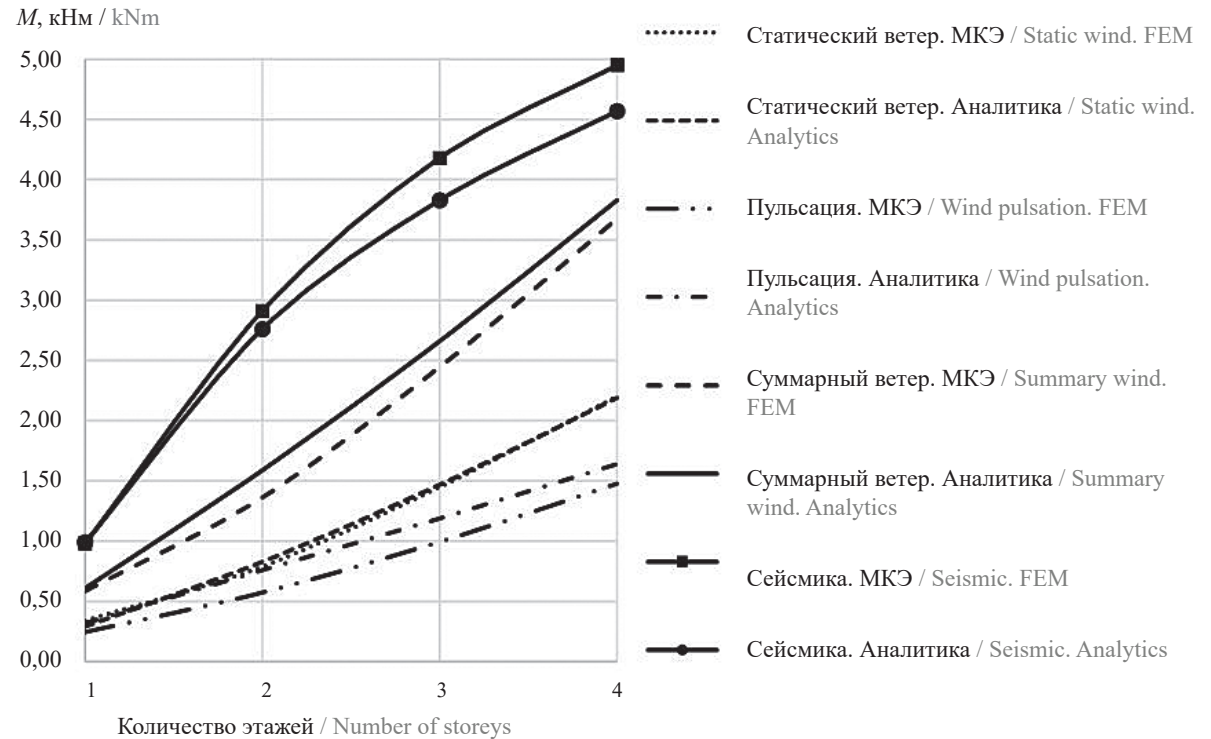


Рис. 6. Изменение опорных моментов в зависимости от этажности здания
Fig. 6. Change of bearing moments depending on the number of storeys of the building

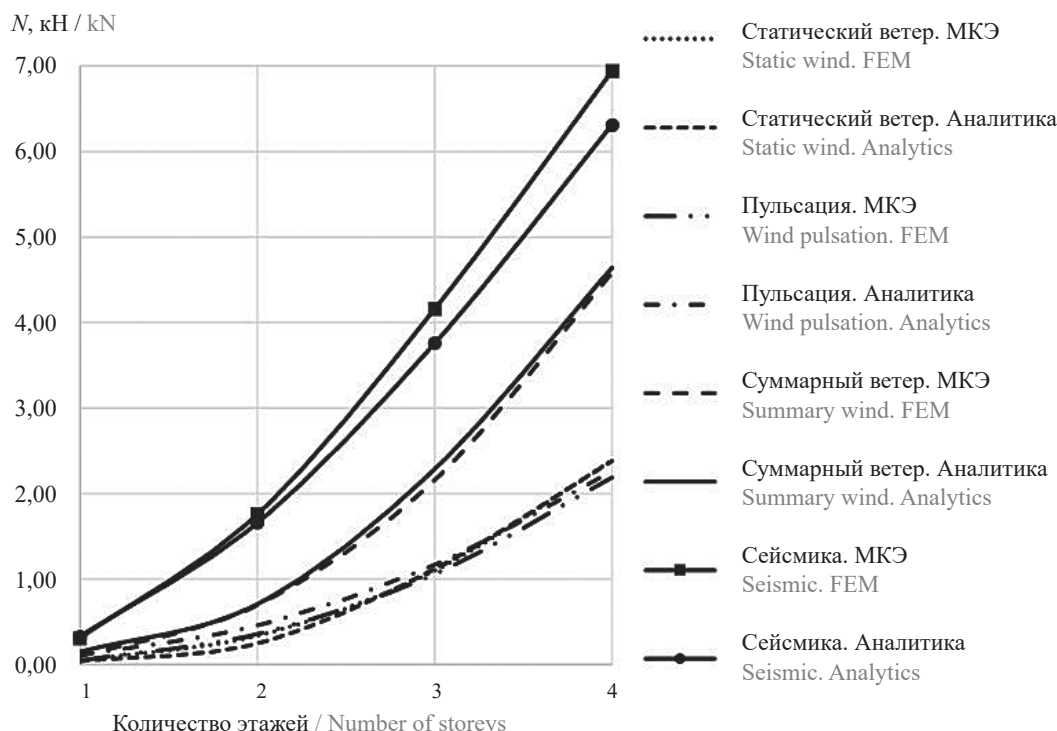


Рис. 7. Изменение продольных сил в зависимости от этажности здания

Fig. 7. Change in longitudinal forces depending on the number of storeys of the building

формированного состояния модульных зданий аналитический метод удобнее, чем МКЭ.

На основе выполненной работы можно сделать следующие выводы.

- Представленный аналитический метод определения усилий в элементах модульных зданий показывает хорошую сходимость результатов с МКЭ. На конкретном примере показано, что расхождение в определении усилий от вертикальных нагрузок практически отсутствует. Расхождение от суммарного воздействия статической и пульсационной составляющих составляет 4,2–16,6 % для моментов и 1,3–6 % для продольных сил. Погрешность

определения усилий от сейсмического воздействия укладывается в интервал 5–10 % как для изгибающих моментов, так и для продольных сил.

- Метод удобен для применения на стадии качественной оценки проектных решений, вариантных расчетов и поиска рациональных конструктивных решений модульных зданий.

- Программа Modular служит удобным инструментом для расчета модульных зданий с точки зрения изучения их силовой работы. Однако при проектировании следует использовать сертифицированные расчетные комплексы, использующие метод конечных элементов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамян С.Г., Илиев А.Б. Особенности технологий быстровозводимых зданий и сооружений // Научные исследования высшей школы в области строительства и архитектуры : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. 2018. С. 22–27. EDN YQHWNF.

2. Захарова М.В., Пономарев А.Б. Опыт строительства зданий и сооружений по модульной технологии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8. № 1. С. 148–155. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.13. EDNYLXSPN.

3. Захарова А.С. Обустройство месторождений нефтегазовой промышленности и их инфраструкту-

ра // Инженерный вестник Дона. 2020. № 11(71). С. 329–338. EDN NWFFYL.

4. Иванов А.А. Анализ рынка блочно-модульных зданий из металлоконструкций для нефтегазовой сферы // Начало в науке : мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. школьников, студентов, магистрантов и аспирантов. 2017. С. 219–222. EDN YJESBN.

5. Lawson R., Ogden R., Pedreschi R., Grubb P., Popo-Ola S. Developments in pre-fabricated systems in light steel and modular construction // The Structural engineer. 2005. Vol. 83. Pp. 28–35.

6. Lawson R.M., Richards J. Modular design for high-rise buildings // Proceedings of the Institu-

tion of Civil Engineers — Structures and Buildings. 2010. Vol. 163. Issue 3. Pp. 151–164. DOI: 10.1680/stbu.2010.163.3.151

7. Thai H.-T., Ngo T., Uy B. A review on modular construction for high-rise buildings // Structures. 2020. Vol. 28. Pp. 1265–1290. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.09.070

8. Ferdous W., Bai Y., Ngo T.D., Manalo A., Mendis P. New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings : a state-of-the-art review // Engineering Structures. 2019. Vol. 183. Pp. 883–893. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.061

9. Innovation in modular building construction. The Hong Kong Institute of Steel Construction, 2018. DOI: 10.18057/ICASS2018.K.05

10. Liew J.Y.R., Dai Z., Chua Y.S. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings // Proceedings 12th international conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures — ASCCS 2018. 2018. DOI: 10.4995/ASCCS2018.2018.7220

11. Liew J.Y.R., Chua Y.S., Dai Z. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings // Structures. 2019. Vol. 21. Pp. 135–149. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.02.010

12. Annan C.D., Youssef M.A., El Naggar M.H. Seismic overstrength in braced frames of modular steel buildings // Journal of Earthquake Engineering. 2008. Vol. 13. Issue 1. Pp. 1–21. DOI: 10.1080/13632460802212576

13. Zhao F., Yu Y., Lin S., Ding F. Evaluation of the working mechanisms and simplified models of endplate-type inter-module connections // Structures. 2021. Vol. 32. Pp. 562–577. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.03.034

14. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Effect of inter-module connection stiffness on structural response of a modular steel building subjected to wind and earthquake load // Engineering Structures. 2020. Vol. 213. P. 110628. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110628

15. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Lateral behaviour of modular steel building with simplified models of new inter-module connections // Engineering Structures. 2021. Vol. 236. P. 112103. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112103

16. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Numerical study of the structural response to wind loading: modular building case study // 13th International Conference on Steel, Space and Composite Structures. 2018.

17. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Structural Response of Modular Buildings : an Overview // Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 16. Pp. 45–56. DOI: 10.1016/j.jobbe.2017.12.008

18. Shirokov V.S., Kholopov I.S., Solovejev A.V. Determination of the frequency of natural vibrations of a modular building // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 655–661. DOI: 10.1016/j.pro-eng.2016.08.218

19. Shirokov V.S., Gordeeva T.E., Bocharov A.Yu. Analytic method of structural analysis of modular buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 775. Issue 1. P. 012148. DOI: 10.1088/1757-899X/775/1/012148

20. Gatheeshgar P., Parker S., Askew K., Poologanathan K., Navaratnam S., McIntosh A. Flexural behaviour and design of modular construction optimised beams // Structures. 2021. Vol. 32. Pp. 1048–1068. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.03.009

Поступила в редакцию 20 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 6 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 18 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Вячеслав Сергеевич Широков — старший преподаватель кафедры металлических и деревянных конструкций; Самарский государственный технический университет (СамГТУ); 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 665300, ResearcherID: N-5278-2016, ORCID: 0000-0001-6285-8895; ShirokovViacheslav@gmail.com;

Татьяна Александровна Белаш — доктор технических наук, профессор кафедры строительных сооружений, конструкций и материалов; НИЦ «Строительство»; 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6; РИНЦ ID: 66498; Belashta@mail.ru;

Татьяна Евгеньевна Гордеева — кандидат технических наук, доцент, декан строительного факультета; Самарский государственный технический университет (СамГТУ); 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244; РИНЦ ID: 301105; nfyuj@rambler.ru.

Вклад авторов:

Широков В.С. — идея, сбор и обработка материала, разработка метода, получение результатов, написание статьи, итоговые выводы.

Белаш Т.А. — научное руководство, доработка текста, итоговые выводы.

Гордеева Т.Е. — научное редактирование текста, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Abramyan S.G., Iliev A.B. Features of technologies of prefabricated buildings and structures. *Scientific research of higher school in the field of construction and architecture : the international scientific-practical conference*. 2018; 22-27. EDN YQHWNF. (rus.).
2. Zakharova M.V., Ponomarev A.B. Experience in constructing buildings and structures using modular technology. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2017; 8(1):148-155. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.13.EDN YLXSPN. (rus.).
3. Zaharova A.S. Arrangement of oil and gas fields and their infrastructure. *Engineering Journal of Don*. 2020; 11(71):329-338. EDN NWFFYL. (rus.).
4. Ivanov A.A. Analysis of the market for block-modular buildings from metal structures for the oil and gas sector. *Beginning in science : materials of the IV international scientific-practical conference of school-children, students, undergraduates and graduate students*. 2017; 219-222. EDN YJEBSN. (rus.).
5. Lawson R., Ogden R., Pedreschi R., Grubb P., Popo-Ola S. Developments in pre-fabricated systems in light steel and modular construction. *The Structural engineer*. 2005; 83:28-35.
6. Lawson R.M., Richards J. Modular design for high-rise buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings*. 2010; 163(3):151-164. DOI: 10.1680/stbu.2010.163.3.151
7. Thai H.-T., Ngo T., Uy B. A review on modular construction for high-rise buildings. *Structures*. 2020; 28:1265-1290. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.09.070
8. Ferdous W., Bai Y., Ngo T.D., Manalo A., Mendis P. New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings : a state-of-the-art review. *Engineering Structures*. 2019; 183:883-893. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.061
9. *Innovation in modular building construction*. The Hong Kong Institute of Steel Construction, 2018. DOI: 10.18057/ICASS2018.K.05
10. Liew J.Y.R., Dai Z., Chua Y.S. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings. *Proceedings 12th international conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures — ASCCS 2018*. 2018. DOI: 10.4995/ASCCS2018.2018.7220
11. Liew J.Y.R., Chua Y.S., Dai Z. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings. *Structures*. 2019; 21:135-149. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.02.010
12. Annan C.D., Youssef M.A., El Naggar M.H. Seismic overstrength in braced frames of modular steel buildings. *Journal of Earthquake Engineering*. 2008; 13(1):1-21. DOI: 10.1080/13632460802212576
13. Zhao F., Yu Y., Lin S., Ding F. Evaluation of the working mechanisms and simplified models of endplate-type inter-module connections. *Structures*. 2021; 32:562-577. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.03.034
14. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Effect of inter-module connection stiffness on structural response of a modular steel building subjected to wind and earthquake load. *Engineering Structures*. 2020; 213:110628. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110628
15. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Lateral behaviour of modular steel building with simplified models of new inter-module connections. *Engineering Structures*. 2021; 236:112103. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112103
16. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Numerical study of the structural response to wind loading: modular building case study. *13th International Conference on Steel, Space and Composite Structures*. 2018.
17. Lacey A.W., Chen W., Hao H., Bi K. Structural response of modular buildings : an overview. *Journal of Building Engineering*. 2018; 16:45-56. DOI: 10.1016/j.job.2017.12.008
18. Shirokov V.S., Kholopov I.S., Solovejv A.V. Determination of the frequency of natural vibrations of a modular building. *Procedia Engineering*. 2016; 153:655-661. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.218
19. Shirokov V.S., Gordeeva T.E., Bocharov A.Yu. Analytic method of structural analysis of modular buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 775(1):012148. DOI: 10.1088/1757-899X/775/1/012148
20. Gatheeshgar P., Parker S., Askew K., Pologanathan K., Navaratnam S., McIntosh A. Flexural behaviour and design of modular construction optimised beams. *Structures*. 2021; 32:1048-1068. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.03.009

Received August 20, 2023.

Adopted in revised form on December 6, 2023.

Approved for publication on January 18, 2024.

BIONOTES: **Viacheslav S. Shirokov** — senior lecturer at the Department of Metal and Wooden Structures; **Samara State Technical University (SamGTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RSCI: 665300, ResearcherID: N-5278-2016, ORCID: 0000-0001-6285-8895; ShirokovViacheslav@gmail.com;

Tatyana A. Belash — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Structures, Constructions and Materials; **Research Center “Construction”**; 6 2nd Institutskaia st., Moscow, 109428, Russian Federation; ID RSCI: 66498; Belashta@mail.ru;

Tatyana E. Gordeeva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Construction and Technology; **Samara State Technical University (SamGTU)**; 244 Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation; ID RSCI: 301105; nfyuj@rambler.ru.

Contribution of the authors:

Viacheslav S. Shirokov — conceptualization, data gathering and processing, method development, results generation, writing of the article, conclusions.

Tatyana A. Belash — scientific supervising, scientific editing of the text, conclusions.

Tatyana E. Gordeeva — scientific editing of the text, conclusions.

The authors declares that there is no conflict of interest.