

УДК 624.139.2

doi: 10.33622/0869-7019.2023.06.10-16

Расчет здания на сейсмическое воздействие в условиях многолетнемерзлых грунтов

Николай Геннадьевич КЕЛАСЬЕВ¹, кандидат технических наук, генеральный директор, kelasyev@mail.ru

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

Вячеслав Дмитриевич ТЕРИН^{2,3}, кандидат технических наук, руководитель центра № 3, доцент НИУ МГСУ, terin@bk.ru

Дмитрий Иванович ЛЕВИН¹, инженер отдела конструктивных систем № 2, d.levin@cniipz.com

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

² НИИЖБ им. А. А. Гвоздева «НИЦ «Строительство», 109428 Москва, 2-я Институтская ул., 6, корп. 5

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. В статье приводятся сценарии, которые необходимо учитывать при расчетах зданий, проектируемых по первому принципу строительства на многолетнемерзлых грунтах в сейсмических районах и с течением времени подверженных изменению температурного режима грунтов основания. Приводится способ моделирования грунтового основания в нелинейной постановке с использованием одноузловых конечных элементов, при этом учитывается возможное изменение жесткости основания во времени. Выполнен расчет здания в нелинейной постановке на сейсмическое воздействие с изменением температурного режима многолетнемерзлых грунтов основания. Показано, что при сейсмическом воздействии и при неравномерных осадках здания возникает большая вероятность образования пластических шарниров в колоннах, вследствие чего возникает риск разрушения здания. Предложены способы защиты здания от разрушения в сложных геофизических условиях строительства с использованием арматуры с повышенными физико-механическими свойствами.

Ключевые слова: сейсмическое воздействие, многолетнемерзлые грунты, расчет здания в нелинейной постановке, моделирование грунтового основания, столбчатый фундамент, температурный коэффициент, пластический шарнир

Для цитирования: Келасьев Н. Г., Авдеев К. В., Терин В. Д., Левин Д. И. Расчет здания на сейсмическое воздействие в условиях многолетнемерзлых грунтов // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 6. С. 10 – 16. doi: 10.33622/0869-7019.2023.06.10-16

CALCULATION OF A BUILDING FOR SEISMIC IMPACT IN PERMAFROST CONDITIONS

Nikolay G. KELASYEV¹, kelasyev@mail.ru

Kirill V. AVDEEV¹, 6136133@mail.ru

Vyacheslav D. TERIN^{2,3}, terin@bk.ru

Dmitriy I. LEVIN¹, d.levin@cniipz.com

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

² Research Center of Construction, NIIZHB named after A. A. Gvozdev, 2-ya Institutskaya ul., 6, korp. 5, Moscow 109428, Russian Federation

³ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. The article presents scenarios that must be taken into account when calculating buildings designed according to the First principle of construction on permafrost soils in seismic areas and over time, subjected to changes in the temperature regime of the foundation soils. A method for modeling a soil base in a non-linear formulation using single-node finite elements is given, while the possible change in the stiffness of the base over time is taken into account. The calculation of the building in a non-linear setting for seismic action with a change in the temperature regime of permafrost soils of the base is carried out. It is shown that under seismic influence and with uneven precipitation of the building, there is a high probability of the formation of plastic hinges in the columns. As a result, there is a risk of destruction of the building. The methods of protecting the building from destruction in difficult geophysical conditions of construction with the use of reinforcement with increased physical and mechanical properties are proposed.

Keywords: seismic impact, permafrost soils, calculation of a building in a nonlinear formulation, modeling of a soil foundation, columnar foundation, temperature coefficient, plastic hinge

For citation: Kelasyev N. G., Avdeev K. V., Terin V. D., Levin D. I. Calculation of a Building for Seismic Impact in Permafrost Conditions. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2023, no. 6, pp. 10–16. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2023.06.10-16

Введение

В настоящее время, как показывают наблюдения [1], происходит перераспределение температуры многолетнемерзлых грунтов (ММГ) на глубине годовых нулевых амплитуд между низкими и высокими значениями в сторону увеличения. В основном такое изменение связано с глобальным климатическим потеплением и активным техногенным воздействием на многолетнемерзлые грунты оснований зданий и сооружений на территориях многоэтажной застройки. Эти изменения существенно влияют на техническое состояние зданий, возведенных по первому принципу строительства на ММГ, что заставляет по-другому взглянуть на выбор принципа использования таких грунтов в условиях сейсмических воздействий.

Постоянно изменяющиеся природные условия вынуждают пересматривать, дополнять и изменять ряд требований к проектированию зданий для обеспечения необходимого уровня надежности и долговечности строительных конструкций.

Поэтому актуальной задачей становится рассмотрение расчетной ситуации, когда в период эксплуатации здание, возведенное по первому принципу в сейсмическом районе, с течением времени сталкивается с изменением температурного режима грунтов основания [2].

Повышение температурного режима многолетнемерзлых грунтов в период эксплуатации, вследствие возможных неравномерных или недопустимых осадок фундамента, может привести к локальным разрушениям надземных частей конструкции здания.

В этой связи цель работы — определение наиболее эффективных методов сейсмической защиты несущих элементов железобетонных каркасных зданий при изменении температурного режима многолетнемерзлых грунтов основания во времени и пониженных температурах окружающей среды.

Материалы и методы исследования

Особую роль в условиях многолетнемерзлых грунтов играет рациональный выбор конструктивного и технологического решения фундамента. В рамках данного исследования рассмотрен фундамент

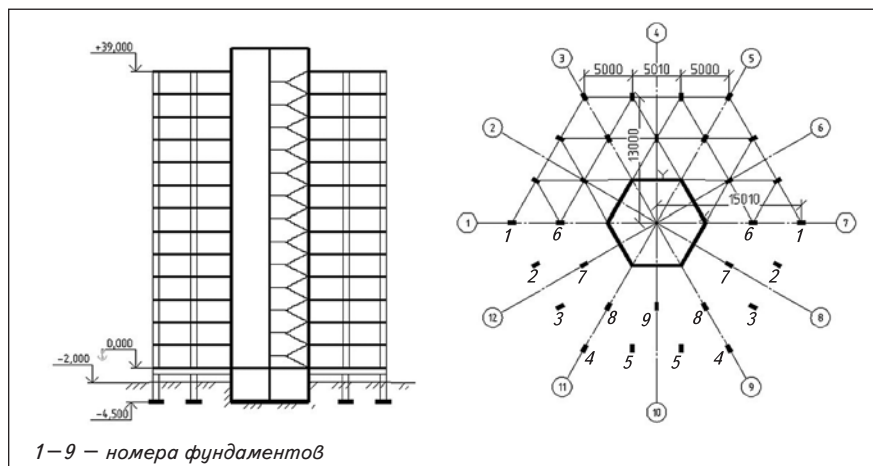


Рис. 1. Несущие конструкции здания (разрез и план)

комбинированной системы, состоящий из плиты в сочетании со столбчатыми фундаментами под пилоны, расположенные радиально по контуру гексагона. Плита, над которой есть вентилируемое пространство, находится в центральной части здания и воспринимает нагрузки от ядра жесткости. Конструктивное решение здания показано на рис. 1.

Важный этап — определение несущей способности основания, которая в соответствии с требованиями СП 25.13330.2012 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» вычисляется по формуле

$$F_u = \gamma_t \gamma_c (RA + \sum_{i=1}^n R_{af,i} A_{af,i}),$$

где γ_t — коэффициент, учитывающий изменения температуры грунтов основания из-за случайных изменений температуры наружного воздуха; γ_c — коэффициент условий работы основания; R — расчетное сопротивление мерзлого грунта под нижним концом сваи или под подошвой столбчатого фундамента, кПа; A — площадь подошвы столбчатого фундамента или площадь опирания сваи на грунт, принимаемая для сплошных свай равной площади их поперечного сечения, для полых свай, погруженных с открытым нижним концом, — площади поперечного сечения сваи брутто при заполнении ее полости цементно-песчаным раствором или грунтом на высоту не менее трех диаметров сваи, m^2 ; $R_{af,i}$ — расчетное сопротивление мерзлого грунта или грунтового раствора сдвигу по боковой поверхности смерзания сваи или столбчатого фундамента в пределах i -го слоя грунта, кПа; $A_{af,i}$ — площадь поверхности смерзания i -го слоя грунта с боковой поверхностью сваи, а для столбчатого фундамента — площадь поверхности смерзания грунта с нижней ступенью фундамента, m^2 ; n — число выделенных при расчете слоев многолетнемерзлого грунта.

Одним из значимых коэффициентов, который влияет на несущую способность основания, сложенного ММГ, является температурный коэффициент

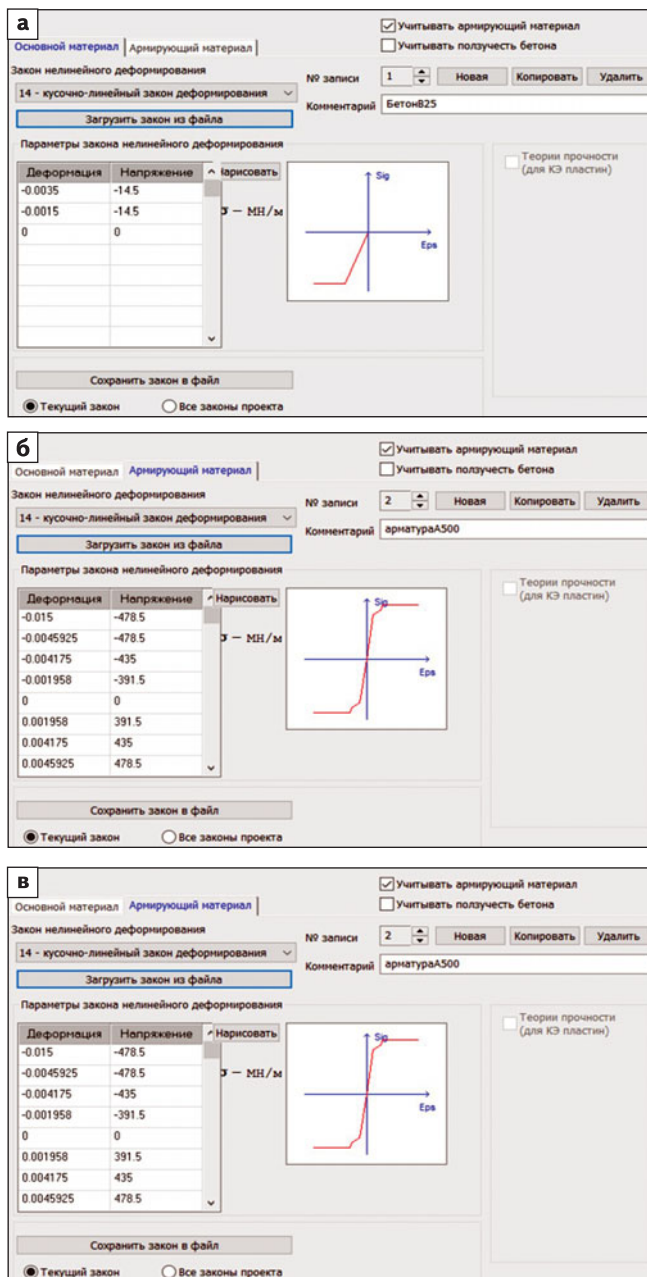


Рис. 2. Диаграммы материалов для бетона класса В25 (а), арматуры классов А500 (б) и Аn600С (в)

ент γ_t [3]. Результаты несущей способности основания наиболее нагруженных фундаментов сведены в табл. 1.

Из представленных результатов расчета несущей способности основания можно заключить, что температурный коэффициент существенно влияет на требуемую площадь подошвы фундамента, причем в большую сторону. Это обстоятельство связано с современными условиями глобального потепления грунтов, что дает возможность с достаточной точностью определить срок службы сооружения на проектной стадии.

Для определения надежности проектных реше-

1. Результаты расчета несущей способности основания фундамента

№ фундамента	Температурный коэффициент γ_t	Несущая способность основания $F_{пр}$, кН	Требуемая площадь подошвы столбчатого фундамента A , м ²
<i>Фундаменты под краем здания</i>			
1	0,3	2235	11,9
2	0,3	2980	16
3	0,3	2980	16
4	0,3	2235	11,9
5	0,3	3053	16,4
<i>Фундаменты под центральной частью здания</i>			
6	0,49	3480	10,56
7	0,49	3176	9,61
8	0,49	3480	10,56
9	0,49	3276	9,92

2. Результаты расчета коэффициентов постели грунта

Диапазон времени, лет	Модуль деформации E , кПа	Коэффициенты постели грунта, кН/м ³		Осадка, мм
		C_1	C_2	
<i>Фундаменты под краем здания</i>				
Начало эксплуатации	50000	19489	56970	9,79
5	26500	10329	30194	18,47
10	22500	8770	25636	21,75
20	19000	7406	21648	25,76
30	17500	6821	19939	27,97
50	15000	5846	17091	32,63
<i>Фундаменты под центральной частью здания</i>				
Начало эксплуатации	50000	22034	73938	14,95
5	32500	14322	48060	23
10	30000	13220	44363	24,92
20	27500	12119	40666	27,18
30	26000	11458	38448	28,75
50	24500	10797	36230	30,51

ний в сложных геофизических условиях целесообразно провести расчеты для следующих сценариев:

- проверочный расчет здания на заданное сейсмическое воздействие в нелинейной постановке сов-

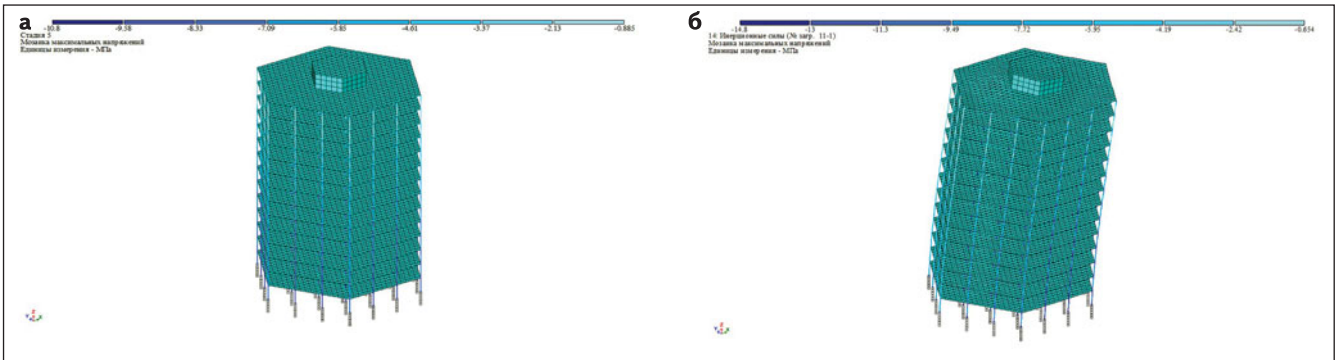


Рис. 3. Мозаика максимальных напряжений в колоннах до сейсмического воздействия (а) и после него (б). Сценарий А

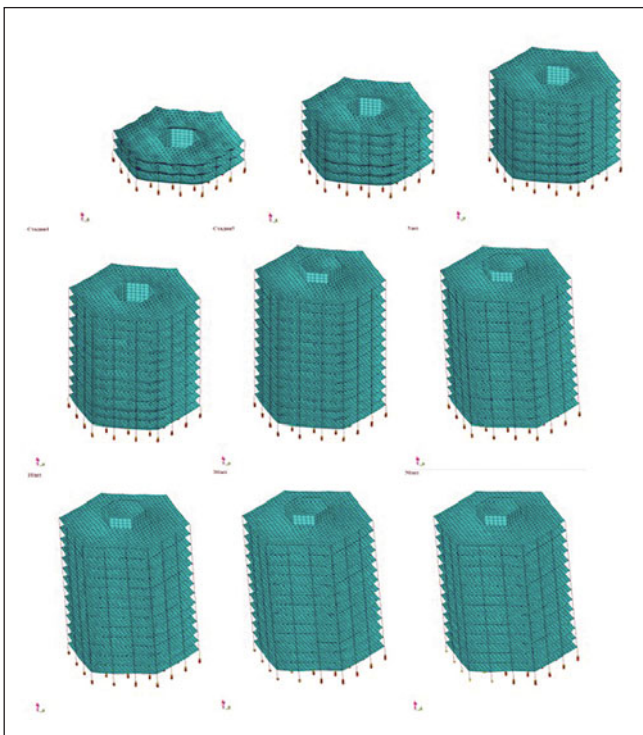


Рис. 4. Деформационные схемы здания на каждой стадии. Сценарий Б

местно с грунтовым основанием согласно требованиям СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах»;

- расчет здания на основное сочетание нагрузок в нелинейной постановке совместно с грунтовым основанием, при изменении температурного режима грунтов основания во времени в соответствии с требованиями СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия»;
- расчет здания на заданное сейсмическое воздействие в нелинейной постановке совместно с грунтовым основанием, при изменении температурного режима грунтов основания во времени;
- то же, с использованием арматуры с повышенными физико-механическими свойствами.

3. Результаты расчета погонных жесткостей одноузловых конечных элементов

Конечный элемент	Погонная жесткость элемента по направлению, кН/м					
	под краем здания			под центральной частью здания		
	X	Y	Z	X	Y	Z
0 лет	102592	102592	146560	57007	57007	81438
5 лет	17460	17460	24944	8146	8146	11637
10 лет	15277	15277	21824	7547	7547	10781
20 лет	6552	6552	9360	4886	4886	6980
30 лет	10920	10920	15600	4886	4886	6980
50 лет	65475	65475	93536	78811	78811	114016

Ввиду того, что проектируемое здание является каркасной конструктивной системой с ядром жесткости, наиболее опасным с точки зрения прогрессирующего обрушения будет потеря несущей способности колонн здания.

В этой связи рассмотрим следующий наиболее опасный сценарий, при котором часть здания, ориентированная на южную сторону, будет больше подвергаться воздействию солнечной радиации и изменению температуры. Соответственно, можно заключить, что и деформационные характеристики грунта будут существенно понижаться под этой частью здания.

В рамках данного исследования реализована следующая методика:

- предварительно вычисляются деформационные характеристики грунтов (коэффициенты постели C_1 и C_2), имеющие свои значения на момент возведения здания;
- устанавливаются диапазоны времени изменения температуры грунтов (5, 10, 20, 30 и 50 лет) и соответствующие этому времени деформационные характеристики грунтов, при этом для момента вре-

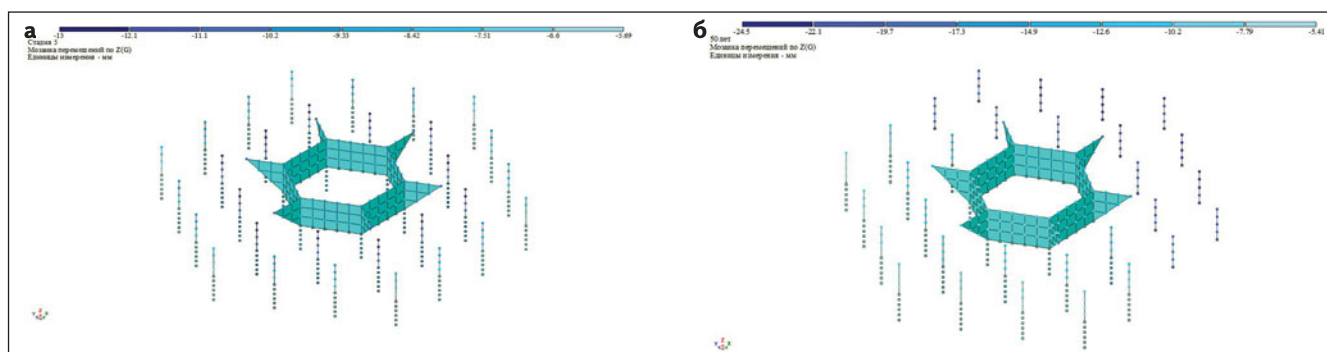


Рис. 5. Мозаика осадок фундамента на начало эксплуатации здания (а) и после 50 лет эксплуатации (б). Сценарий Б

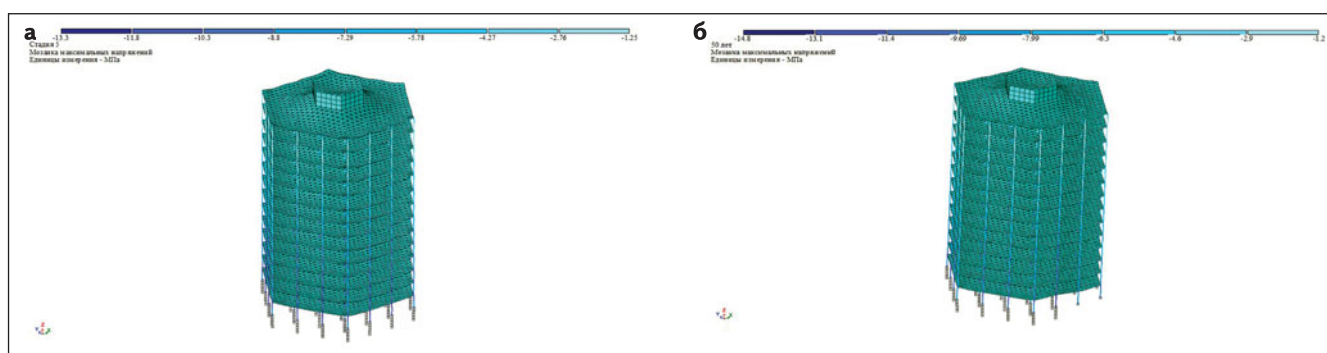


Рис. 6. Мозаика максимальных напряжений в колоннах на начало эксплуатации здания (а) и после 50 лет эксплуатации (б). Сценарий Б

мени 50 лет они принимаются, как для ММГ при температуре заморзания;

- в расчетной схеме под каждым фундаментом моделируются шесть одноузловых конечных элементов (КЭ), объединенных абсолютно жестким телом, которые в совокупности определяют деформационные характеристики грунта на момент возведения здания;
- при помощи модуля «Монтаж-плюс» поочередно демонтируются одноузловые КЭ, соответствующие заданным диапазонам времени.

Данная методика моделирования взаимодействия грунтового основания со зданием может быть реализована в таких расчетных комплексах, как SCAD, ЛИРА 10, ЛИРА САПР [4] и др.

В табл. 2 приведены результаты расчета коэффициентов постели C_1 и C_2 для всех диапазонов времени [5].

При выполнении расчетов было использовано допущение, что изменение модуля деформации в каждый период времени напрямую зависит от изменения температурного коэффициента.

Далее формируется группа одноузловых КЭ, которая должна в совокупности изменять деформационные характеристики в каждый период времени, как это вычислено в табл. 2. В табл. 3 представлены результаты расчета погонных жесткостей

одноузловых КЭ, рассчитанные на основное сочетание нагрузок.

Для учета динамической жесткости грунтов основания при сейсмических воздействиях необходимо увеличивать погонную жесткость одноузловых КЭ от 7 до 15 раз в зависимости от свойств грунтов. В рамках данного исследования жесткость увеличена в 10 раз.

Результаты исследований

В соответствии с СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции» в качестве рабочих диаграмм состояния бетона класса В25, определяющих связь между напряжениями и относительными деформациями, принята упрощенная двухлинейная диаграмма.

В качестве рабочих диаграмм состояния арматуры классов А500 и А600С^{1,2} принята упрощенная трехлинейная диаграмма по типу Прандтля.

На рис. 2 для бетона класса В25, арматуры классов А500 и А600С представлены диаграм-

¹ СТО НОСТРОЙ/НОП 2.6.98-2014. Конструкции железобетонные. Применение арматуры с повышенными эксплуатационными свойствами из стали марки 20Г2СФБА (класс А600С).

² Пособие по проектированию железобетонных конструкций с арматурой марки 20Г2СФБА (класс А600С) с повышенными эксплуатационными свойствами.

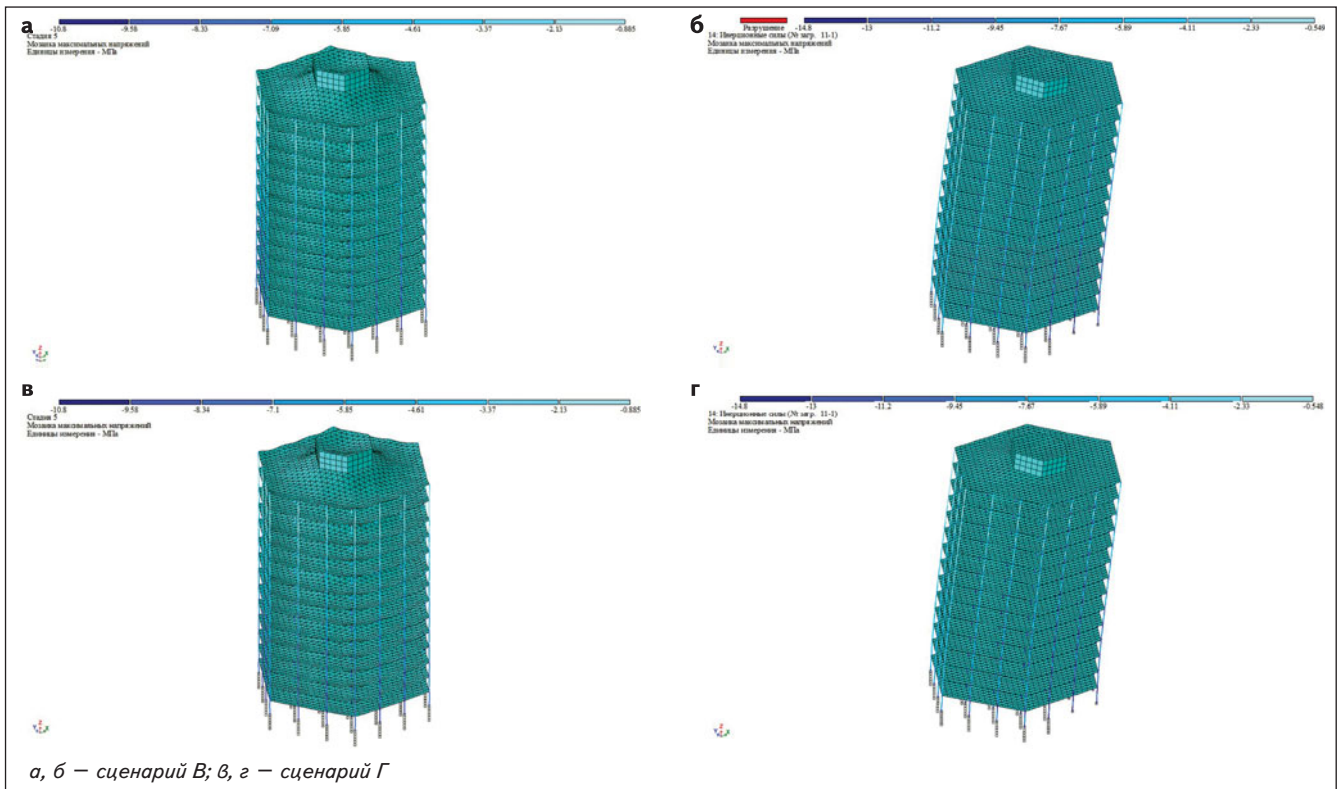


Рис. 7. Мозаика максимальных напряжений в колоннах до сейсмического воздействия (а, в) и после него (б, г)

мы деформационных и прочностных характеристик.

Далее на рис. 3–7 показаны результаты расчета по всем перечисленным ранее сценариям.

Главный критерий прочности и устойчивости здания — оценка напряженно-деформированного состояния несущих конструкций здания, в том числе колонн. В этой связи полученные результаты расчета показали следующее.

При сценарии А напряжения в основном материале при сейсмическом воздействии в отдельных колоннах достигли значения, соответствующего расчетному сопротивлению бетона класса В25, равному 14,5 МПа. При этом разрушения в элементах не происходит ввиду образования пластических шарниров. Соответственно, заданный процент армирования несущих элементов обеспечивает необходимый уровень прочности и устойчивости здания.

При сценарии Б напряжения в основном материале в начале эксплуатации здания не превышают расчетного сопротивления бетона класса В25. Однако при изменении деформационных свойств грунтов основания происходят неравномерные осадки здания, вследствие чего появляются пластические шарниры в отдельных несущих колоннах.

При сценарии В напряжения в основном материале при сейсмическом воздействии вызвали разрушения в отдельных колоннах. Соответственно, при-

менение арматуры класса А500 при заданном проценте армирования не обеспечивает необходимый уровень прочности и устойчивости здания.

Результаты расчета по сценарию Г показывают, что необходимый уровень прочности и устойчивости здания обеспечен. В этой связи применение в качестве рабочей арматуры класса А600С из стали марки 25Г2СФБА при заданном проценте армирования несущих элементов обеспечивает необходимый уровень прочности и устойчивости здания [6, 7].

Выводы

1. Проведена серия расчетов по рассмотренным сценариям, которая показала, что при изменении деформационных свойств грунтов основания в условиях многолетнемерзлых грунтов происходят неравномерные осадки здания, вследствие чего изменяются напряжения в несущих элементах каркаса здания, как правило, не в меньшую сторону. При этом в отдельных колоннах могут возникнуть пластические шарниры.

2. Ситуация значительно осложняется при сценарии, когда здание уже имеет критические напряжения в колоннах и происходит сейсмическое воздействие, т. е. при заданном проектном армировании наступает разрушение. Даже в случае развития пластических шарниров, условия пониженных тем-

ператур могут вызвать хрупкое разрушение арматуры. Однако использование арматуры класса АН600С из стали марки 25Г2СФБА увеличивает несущую способность колонн здания при сейсмическом воздействии.

3. Рассмотренный способ сейсмической защиты

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рабинович М. В., Набережный А. Д. Формирование температурного режима многолетнемерзлых грунтов оснований зданий на территории многоэтажной застройки города Якутска // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 70–76.
2. Власов В. П., Гулый С. А., Чегурова И. В. Влияние сейсмических проявлений на устойчивость зданий в криолитозоне // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007. № 1. С. 21–25.
3. Хресталев Л. Н., Емельянова Л. В. Определение температурного коэффициента при расчете несущей способности вечномерзлого основания в условиях меняющегося климата // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2013. № 1. С. 14–16.
4. Стрелец-Стрелецкий Е. Б., Журавлев А. В., Водопьянов Р. Ю. ЛИРА-САПР. Кн. I. Основы. Изд-во

наиболее актуален в условиях многолетнемерзлых грунтов и для зданий с вентилируемым холодным подпольем, так как обеспечивается не только прочность, но и сохраняются эксплуатационные свойства арматуры в условиях пониженных температур.

LIRALAND, 2019. 154 с.

URL: <https://www.lirasapr.com/books/10/4493/> (дата обращения: 29.03.2023).

5. Горбунов-Посадов М. И., Маликова Т. А. Расчет конструкций на упругом основании. М. : Стройиздат, 1973. 627 с.
6. Кодыш Э. Н., Трекин Н. Н., Соседов К. Е. Арматурная сталь марки 20Г2СФБА класса АН600С с повышенными эксплуатационными свойствами для сейсмостойкого строительства // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2014. № 1. С. 45–48.
7. Мадатян С. А., Климов Д. Е. Свойства стержневой арматурной стали при криогенных температурах // Бетон и железобетон. 2014. № 6. С. 19–22.

REFERENCES

1. Rabinovich M. V., Naberezhny A. D. Formation of the temperature regime of permafrost soils of the foundations of buildings on the territory of multi-storey buildings of the city of Yakutsk. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2019, no. 3, pp. 70–76. (In Russ.).
2. Vlasov V. P., Gulyj S. A., Chegurova I. V. The influence of seismic manifestations on the stability of buildings in the cryolithozone. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2007, no. 1, pp. 21–25. (In Russ.).
3. Hrestalev L. N., Emel'yanova L. V. Determination of the temperature coefficient when calculating the bearing capacity of the permafrost base in a changing climate. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2013, no. 1, pp. 14–16. (In Russ.).
4. Strelec-Streleckiy E. B., Zhuravlev A. V., Vodop'yanov

R. Yu. *LIRA-SAPR. Kn. I. Osnovy* [LIRA-CAD. Book I. The basics]. LIRALAND Publ., 2019. 154 p. Available at: <https://www.lirasapr.com/books/10/4493/> (accessed 29.03.2023). (In Russ.).

5. Gorbunov-Posadov M. I., Malikova T. A. *Raschet konstrukcij na uprugom osnovanii* [Calculation of structures on an elastic base]. Moscow, Strojizdat Publ., 1973. 627 p. (In Russ.).
6. Kodysh E. N., Trekin N. N., Sosedov K. E. Reinforcing steel grade 20G2SFBA class AN600S with enhanced performance properties for earthquake-resistant construction. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy*, 2014, no. 1, pp. 45–48. (In Russ.).
7. Madatyan S. A., Klimov D. E. Properties of core reinforcing steel at cryogenic temperatures. *Beton i zhelezobeton*, 2014, no. 6, pp. 19–22. (In Russ.). ■



ВО • ЦНИИПРОМЗДАНИЙ •

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ
ИНСТИТУТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Адрес: 127238 Москва, Дмитровское ш., 46, корп. 2

Сайт: cniipz.ru