

УТКИНА В. Н., ГРЯЗНОВ С. Ю., БАБУШКИНА Д. Р.
РАСЧЕТ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ
ПЕРЕКРЫТИЙ ВЫСОТНОГО ЖИЛОГО КОМПЛЕКСА
С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Аннотация. В статье представлены результаты линейного и нелинейного расчетов монолитных железобетонных плит перекрытий, полученные на основе пространственной модели конструктивной системы высотного жилого комплекса. Формирование модели и общие расчеты методом конечных элементов выполнены в ПК МОНОМАХ-САПР.

Ключевые слова: высотное здание, конструктивная система, монолитные железобетонные плиты перекрытий, программный комплекс МОНОМАХ-САПР, МКЭ-расчет, физическая нелинейность, жесткостные характеристики, модуль упругости.

UTKINA V. N., GRYAZNOV S. Y., BABUSHKINA D. R.
CALCULATION OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE SLABS
OF HIGH-RISE RESIDENTIAL COMPLEX
TAKING INTO ACCOUNT PHYSICAL NONLINEARITY

Abstract. The article presents the results of linear and nonlinear calculations of monolithic reinforced concrete floor slabs, obtained on the basis of a spatial model of the structural system of a high-rise residential complex. The formation of the model and general calculations by the finite element method were performed in the MONOMAKH-CAD software package.

Key words: high-rise building, structural system, monolithic reinforced concrete floor slabs, MONOMAKH-CAD software package, FEM-calculation, physical nonlinearity, rigidity characteristics, elastic modulus.

Введение. Расчет строительных конструкций, зданий и сооружений с учетом различных видов нелинейностей – важная и сложная научно-техническая задача, решением которой занимаются многие ученые и инженеры [1 – 5]. Применение в практике проектирования закономерностей работы строительных конструкций за пределами линейных законов позволяет выявлять дополнительные резервы несущей способности, снижать материалоемкость, осуществлять моделирование процессов жизненного цикла, этапов нагружения и возведения, учитывать изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции во времени при эксплуатации, обеспечивать устойчивость от прогрессирующего обрушения. Все это в конечном итоге приводит к принятию наиболее экономичных и эффективных решений [2; 6].

Очевидно, что подобные расчеты очень трудо- и ресурсоемки. Даже не смотря на стремительное развитие компьютерных технологий в последние несколько десятилетий, большая часть всех расчетов строительных конструкций производится на основе упрощенных физических моделей [3; 4].

Сегодня в практике проектирования строительных конструкций, зданий и сооружений широко применяются программные комплексы компьютерного инженерного анализа (CAE), основанные на методе конечных элементов (МКЭ). Данный метод является основным в современной строительной механике и позволяет в значительной степени автоматизировать расчет. Примерами комплексов CAE являются пакеты программ ANSYS, NASTRAN, COSMOS, STARK, SCAD, ЛИРА, МОНОМАХ и другие [7]. Кроме того, многие из этих программных комплексов поддерживают технологию информационного моделирования (BIM). Она в последнее время все больше проникает в строительную отрасль, диктуя новый подход в проектировании инженерных объектов, основанный на создании полноценных информационных моделей. Данные передовые технологии разрабатываются с целью – приблизить теоретические расчеты к фактической работе конструкций и научиться прогнозировать их состояние с течением времени.

Цель работы – выполнить расчет и анализ напряженно-деформированного состояния монолитных плит перекрытий высотного жилого комплекса с учетом нелинейных свойств железобетона.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: создать пространственную модель конструктивной системы высотного жилого комплекса в ПК МОНОМАХ-САПР; выполнить линейный и нелинейный расчеты методом конечных элементов и анализ полученных результатов; изучить возможность использования упрощенных моделей для оценки действительной работы монолитных плит перекрытий с учетом физической нелинейности железобетона.

Результаты исследования и их анализ. Принимая во внимание вышесказанное, следует отметить, что расчет нелинейных систем является более сложной задачей по сравнению с решением линейных задач, основанных на обобщенном законе Гука, т.е. линейных зависимостях между напряжениями (σ) и деформациями (ε).

В данной работе нас интересует физическая нелинейность, при которой связь между напряжениями и деформациями записывается в общем виде так:

$$\sigma = E(\varepsilon) \varepsilon ,$$

где $E(\varepsilon)$ – это матрица, характеризующая физические свойства материала.

Таким образом, учитывая физическую нелинейность, получаем систему нелинейных алгебраических уравнений, решение которой находится с помощью шаговых или

итерационных методов. При этом среди известных алгоритмов расчета нелинейных систем отсутствует какой-либо универсальный способ. Эффективность каждого из методов зависит, главным образом, от типа и параметров проявляющейся нелинейности [5].

В специализированном программном комплексе МОНОМАХ-САПР 2013 реализована возможность учета физической нелинейности железобетона при расчете конструкций монолитных высотных зданий [8; 9]. Объектом наших исследований является 25-ти этажный жилой комплекс высотой 99,55 м со стилобатом и подземными этажами. В работе [10] приводятся архитектурные и конструктивные решения здания, а также результаты линейного и нелинейного расчетов пространственной модели монолитной конструктивной системы, выполненных в ПК МОНОМАХ-САПР.

На рисунке 1 представлена расчетная схема здания, которая состоит из оболочечных и стержневых конечных элементов. Общие расчеты при эксплуатационных нагрузках и воздействиях показали, что принятая монолитная несущая система обеспечивает прочность, устойчивость и пространственную неизменяемость высотного здания и его отдельных элементов. Полученные основные параметры конструктивной системы (горизонтальные перемещения верха, перекос этажных ячеек, прогибы элементов перекрытий, коэффициенты запаса устойчивости, средняя осадка, разность осадок и другие) не превышают предельно допустимых значений, установленных соответствующими нормативными документами [11–14].

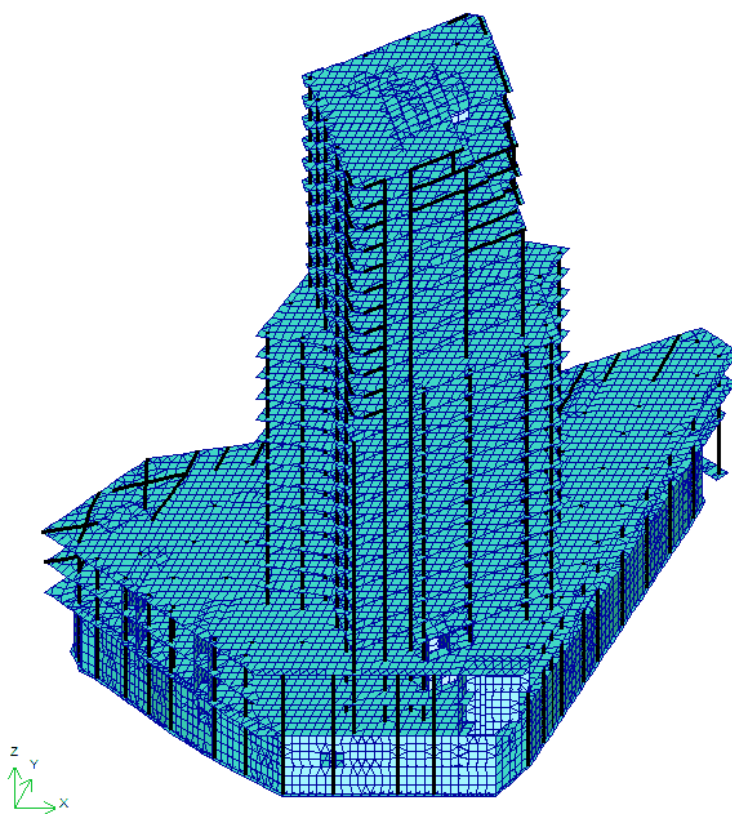


Рис. 1. Расчетная конечно-элементная схема здания.

В процессе нагружения железобетонных конструкций, как на стадии возведения, так и в процессе эксплуатации могут проявиться такие специфические особенности железобетона, как ползучесть или возникновение трещин в растянутых зонах. Вследствие чего, будет происходить изменение жесткостных характеристик элементов. Это приводит к перераспределению усилий, значительному увеличению перемещений по сравнению с линейно-упругим расчетом.

Нормативные документы ориентируют инженера на учет этих факторов при проектировании. В сводах Правил Российской Федерации (СП 63.13330.2012, СП 267.1325800.2016, СП 430.1325800.2018) рекомендуется проводить расчет конструктивных систем в пространственной постановке с учетом физической нелинейности материалов [13 – 15]. Выполнение нелинейного расчета занимает значительное время и требует существенных вычислительных мощностей компьютеров, а также соответствующего программного обеспечения. В связи с этим, для учета вышеизложенных факторов в инженерных расчетах предлагается вводить понижающие коэффициенты при определении модуля упругости бетона и жесткости сечений. Согласно п. 8.2.4.15 СП 267.1325800.2016 [14] эти коэффициенты равны: 0,6 – для вертикальных сжатых элементов; 0,2 – для изгибаемых элементов при наличии трещин и 0,3 – при отсутствии трещин. Конечно, такое предположение только приблизительно учитывает снижение жесткости сечений в зависимости от характера напряженно-деформированного состояния элемента. В таблице 1 представлены значения начального модуля упругости бетона E_{b0} и с учетом понижающих коэффициентов – $E_{b,\tau}$ для вертикальных и горизонтальных несущих конструкций здания.

Таблица 1

Снижение начального модуля упругости бетона согласно СП 267.1325800.2016

Класс бетона	E_{b0}	Для вертикальных сжатых элементов		Для плит перекрытий (покрытий) при отсутствии трещин	
		понижающий коэффициент	$E_{b,\tau}$	понижающий коэффициент	$E_{b,\tau}$
	МПа		МПа		МПа
B35	34500	0,6	20700	0,3	10350
B40	36000	0,6	21600	0,3	10800
B60	39500	0,6	23700	0,3	11850

В соответствии с п. 6.1.15 СП 63.13330.2012 [13] при продолжительном действии нагрузки значение модуля деформаций бетона следует определять по формуле

$$E_{b,\tau} = E_{b0} / (1 + \varphi_{b,cr}) ,$$

где $\varphi_{b,cr}$ – коэффициент ползучести бетона, принимаемый согласно п. 6.1.16; E_{b0} – начальный модуль упругости бетона.

Вычисленные по СП 63.13330.2012 значения модуля деформаций бетона при продолжительном действии нагрузки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Снижение начального модуля упругости согласно СП 63.13330.2012

Класс бетона	E_{b0}	$\varphi_{b,cr}$	$E_{b,\tau}$
	МПа		МПа
B35	34500	2,1	11129,03
B40	36000	1,9	12413,79
B60	39500	1,4	16458,33

Оба этих подхода позволяют оценить действительную ситуацию. Это можно продемонстрировать на примере следующих расчетов конструктивной системы здания.

Результаты определения напряженно-деформированного состояния монолитных плит перекрытий, полученные на основе линейных и нелинейных расчетов конструктивной системы здания, представлены на графиках (рис. 2 – 5). Здесь введены следующие обозначения: ЛР – линейный расчет; НР – нелинейный расчет; ЛР, СП 267 и ЛР, СП 63 – линейные расчеты при пониженных значениях модуля упругости бетона (табл. 1 и 2).

На рисунках 2 и 3 показаны графики экстремальных (максимальных и минимальных) значений перемещений плит перекрытий -2 – 25 этажей соответственно.

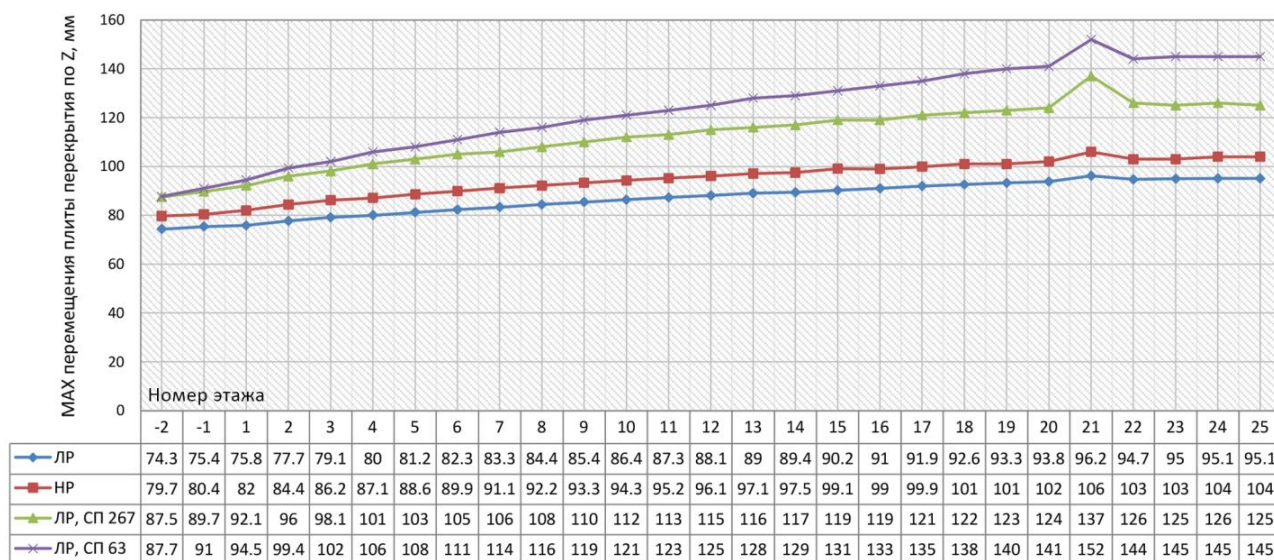


Рис. 2. Графики максимальных перемещений плит перекрытий при различных методах расчета.

Максимальные значения перемещений, полученные при упрощенном расчете по рекомендациям СП 267.1325800.2016, превышают значения перемещений при линейном расчете (ЛР) на 15,09 % – 29,78 %. Результаты расчета, полученные по рекомендациям СП 63.13330.2012, превышают результаты линейного расчета (ЛР) на 15,28 % – 36,71 %. Меньшее превышение значений наблюдается при анализе минимальных перемещений плит перекрытий.

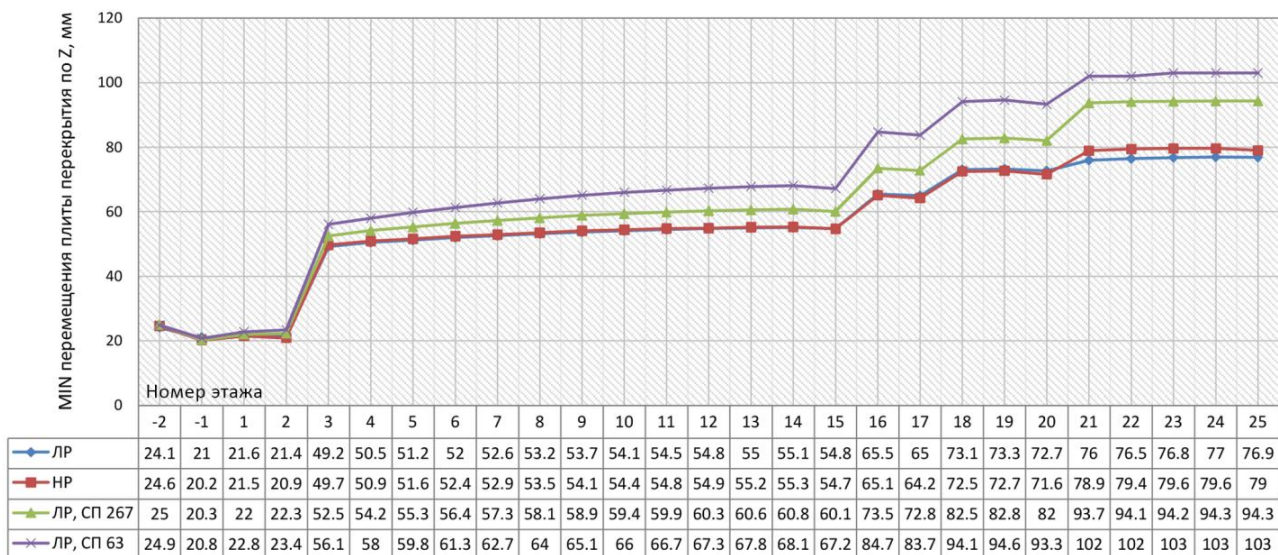


Рис. 3. Графики минимальных перемещений плит перекрытий при различных методах расчета.

На рисунках 4 и 5 показаны графики экстремальных значений опорных и пролетных изгибающих моментов в плитах перекрытий -2 ÷ 25 этажей соответственно, полученные при линейном и нелинейном расчетах.

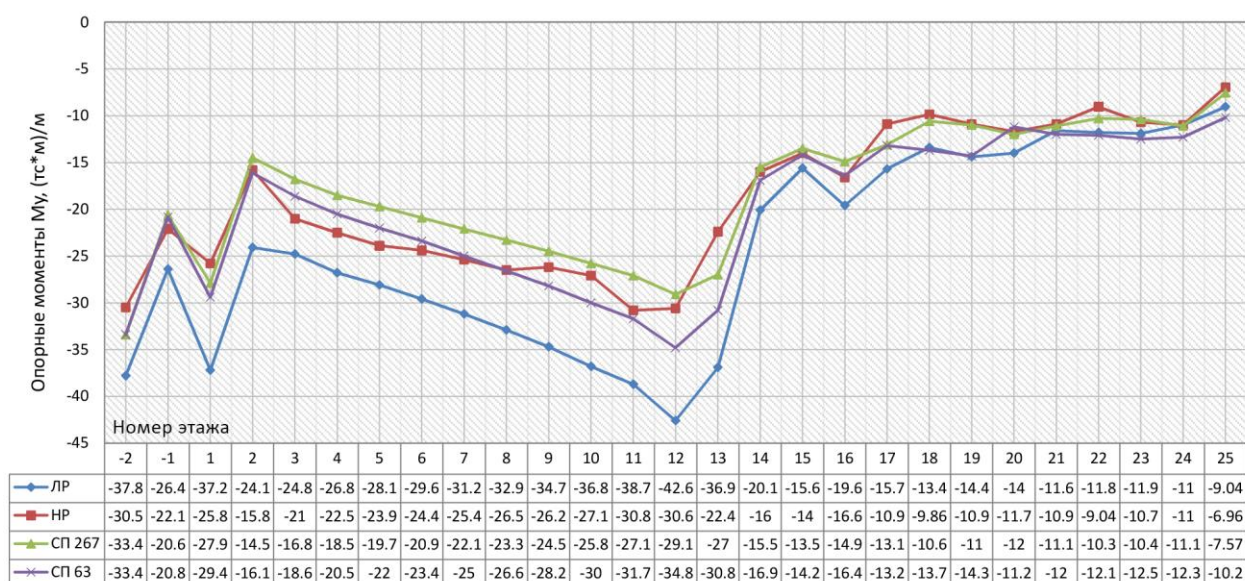


Рис. 4. Сравнение опорных моментов (M_y) плит перекрытий при различных методах расчета.

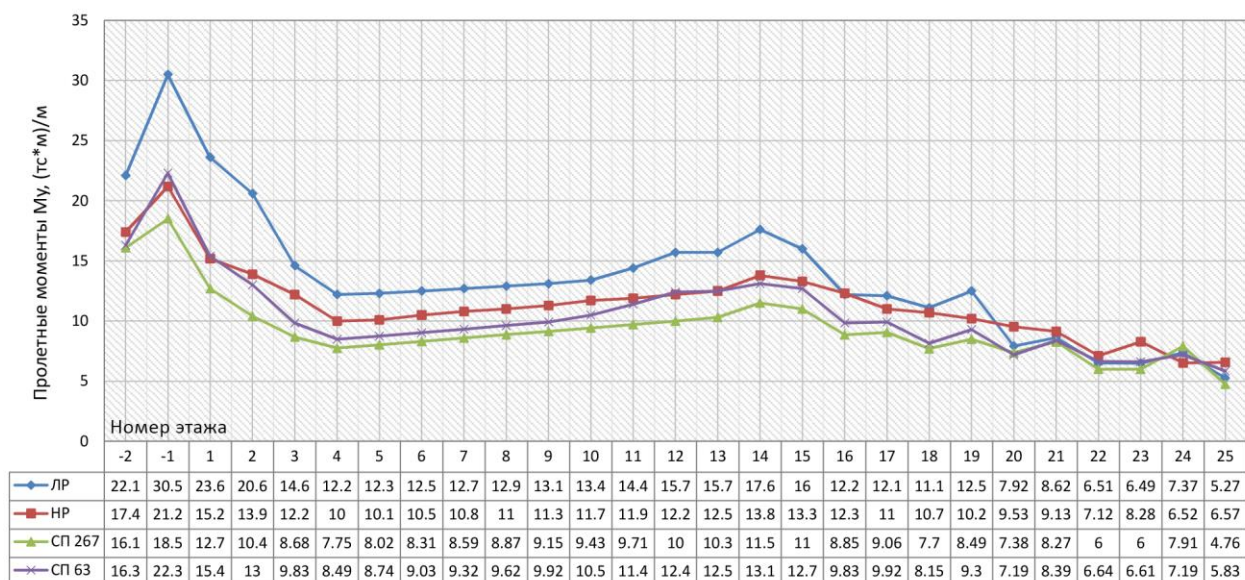


Рис. 5. Сравнение пролетных моментов (M_u) плит перекрытий при различных методах расчета.

Выводы. На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Снижение модуля упругости бетона и жесткости сечений согласно рекомендациям СП 267.1325800.2016 и СП 63.13330.2012 существенно сказывается на результатах вертикальных перемещений конструктивной системы в целом;

2. Анализ результатов опорных и пролетных изгибающих моментов в плитах перекрытий показал следующие зависимости. Как при нелинейном расчете, так и при линейных расчетах с пониженными модулями упругости бетона, значения моментов в плитах уменьшаются практически на всех этажах. Более того, результаты нелинейного и упрощенных расчетов по рекомендациям СП 267.1325800.2016 и СП 63.13330.2012 очень похожи по характеру изменения от этажа к этажу и близки по значениям. Этот факт позволяет в некоторой степени утверждать, что предварительно оценить действительную работу железобетонных конструкций можно упрощенными методами, определяя жесткости сечений с помощью условных понижающих коэффициентов. Такие расчеты следует выполнять только лишь для начального анализа работы конструкций и конструктивной системы в целом;

3. На последующих этапах расчета конструктивной системы, когда известно армирование железобетонных элементов, для получения более точных результатов необходимо производить расчет с учетом нелинейных жесткостей, учитывающих армирование, образование трещин и развитие неупругих деформаций в бетоне и арматуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Городецкий А. С., Барабаш М.С. Учет нелинейной работы железобетона в ПК ЛИРА-САПР. Метод «Инженерная нелинейность» // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. – 2016. – № 2 (12). – С. 92-98.
2. Нелинейность в ЛИРА-САПР. Алгоритмы создания расчетных моделей с учетом нелинейной работы конструкций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://help.liraland.ru/984/3426/?sphrase_id=14578411 (дата обращения 15.03.2021).
3. Блохина Н. С., Назаренко С. Н. Моделирование физически нелинейных и анизотропных свойств материала при расчете строительных конструкций в программном комплексе ANSYS // Инновации и инвестиции. – 2018. – №1. – С. 186-188.
4. Блохина Н. С. Проблема учета физической нелинейности при расчете строительных конструкций // Вестник МГСУ. – 2011. – № 6. – С. 384-387.
5. Сухов М. Ф., Кожанов Д.А. Нелинейные задачи строительной механики : учеб. пособие. – Н. Новгород : Изд-во ННГАСУ, 2017. – 66 с.
6. Уткина В. Н., Безрукова Е. С. Исследование устойчивости несущей системы каркасно-монолитного здания к прогрессирующему обрушению // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций : материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию засл. деятеля науки РФ, акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. Селяева В. П., 3–5 дек. 2019 г., г. Саранск / редкол.: В. П. Селяев, А. Л. Лазарев (отв. ред.) и др. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2019. – С. 381-388.
7. Фокин В. Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твердого тела: учеб. пособие. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 131 с.
8. Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций. – М.: АСВ, 2009. – 344 с.
9. Городецкий Д. А., Юсипенко С. В., Батрак Л. Г., Лазарев А. А., Рассказов А. А. МОНОМАХ-САПР 2013. Примеры расчета и проектирования : учеб. пособие. – К. : Электронное издание, 2013. – 368 с.
10. Уткина В. Н., Грязнов С. Ю., Бабушкина Д. Р. Проектирование монолитных железобетонных плит перекрытий высотного жилого комплекса с применением ПК МОНОМАХ-САПР [Электронный ресурс] // Огарёв-online. – 2020. – № 3. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/proektirovanie-monolitnykh-zhelezobetonnykh-plit-perekrytij-vysotnogo-zhilogo-kompleksa-s-primeneniem-pk-monomax-sapr> (дата обращения 02.03.2021).

11. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М. : Стандартинформ, 2018. – 95 с.
12. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями N 1, 2, 3). – М. : Стандартинформ, 2017. – 162 с.
13. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М. : Минстрой России, 2012. – 168 с.
14. СП 267.1325800.2016. Здания и комплексы высотные. Правила проектирования. – М. : Стандартинформ, 2017. – 102 с.
15. СП 430.1325800.2018. Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования. – М.: Минстрой России, 2018. – 67 с.