

**УТКИНА В. Н., ГРЯЗНОВ С. Ю., БАБУШКИНА Д. Р.**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ МОНОЛИТНОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ВЫСОТНОГО  
ЗДАНИЯ С ВВЕДЕНИЕМ АБСОЛЮТНО ЖЕСТКИХ ТЕЛ**

**Аннотация.** В статье представлены результаты моделирования, расчета и исследования напряженно-деформированного состояния монолитной конструктивной системы высотного здания в ПК МОНОМАХ-САПР. Выполнен анализ результатов с введением абсолютно жестких тел при моделировании сопряжений различных типов конечных элементов.

**Ключевые слова:** высотное здание, монолитная конструктивная система, моделирование, МКЭ расчет, исследование, напряженно-деформированное состояние, плиты перекрытий, колонны, абсолютно жесткое тело.

**UTKINA V. N., GRYZANOV S. Y., BABUSHKINA D. R.**

**MODELING AND RESEARCH OF STRESS-STRAIN STATE OF MONOLITHIC  
STRUCTURAL SYSTEM OF HIGH-RISE BUILDINGS  
WITH INTRODUCTION OF ABSOLUTELY RIGID BODIES**

**Abstract.** The article presents the results of modeling, calculation and research of the stress-strain state of a monolithic structural system of a high-rise building in the MONOMAKH-CAD software package. The results are analyzed with the introduction of absolutely rigid bodies in the simulation of conjugations of various types of finite elements.

**Keywords:** high-rise building, monolithic structural system, modeling, FEM calculation, research, stress-strain state, floor slabs, columns, absolutely rigid body.

**Введение.** С точки зрения строительной механики, для выполнения каких-либо расчетов, все проектируемые здания, сооружения и отдельные конструкции на начальном этапе создания расчетной схемы должны быть максимально упрощены и идеализированы. Этот процесс опытные специалисты, зачастую, выполняют на подсознательном уровне.

Начиная с 60-х годов XX столетия, в практику проектирования строительных конструкций активно внедряются различные расчетные комплексы, развитие которых в настоящее время происходит темпами геометрической прогрессии.

Сегодня у современных проектировщиков может складываться стойкий стереотип об обесценивании практических навыков конструирования и расчетов в связи с повсеместным переходом к технологиям параметрического моделирования как сложных, уникальных архитектурных объектов, так и элементарных. Это заблуждение становится по-настоящему

глобальной проблемой зависимости проектировщиков от сложных расчетных комплексов, которую еще только предстоит ощутить.

С развитием возможностей программного обеспечения необходимо уделять огромное внимание умению современных инженеров анализировать полученные результаты и своевременно выявлять всевозможные ошибки и неточности.

По своей сути, процесс проектирования любого инженерного сооружения проходит в несколько основных стадий. Сначала архитектурный объект нужно идеализировать для возможности выполнения упрощенного расчета, а затем частично детализировать, т.е. восстановить некоторые параметры конструкций и материалов для более сложных расчетов (например, с учетом различных нелинейностей или моделирования узлов) [1; 2].

Стремление приблизить теоретические модели к их реальной работе за счет выполнения специальных расчетов позволяет получать наиболее рациональные и экономически оправданные решения проектируемого объекта. Но именно на этапе детализации, как правило, возникают всевозможные ошибки, избежать которые можно в результате более глубокого понимания инженерами реальной работы конструкций и материалов.

В данной статье основное внимание уделяется вопросу моделирования отдельных конструктивных решений, а именно примыкания вертикальных несущих элементов (колонн и стен) к горизонтальным (плитам перекрытий) за счет введения абсолютно жестких тел (АЖТ), позволяющих учитывать «тело» колонн и стен в расчетной схеме высотного каркасно-монолитного здания.

**Цель работы:** выполнить моделирование, расчет и анализ результатов напряженно-деформированного состояния монолитной конструктивной системы высотного здания с введением абсолютно жестких тел при сопряжении колонн, стен и плит в пространственной расчетной схеме.

**Задачи:** сформировать пространственную модель конструктивной системы высотного здания в ПК МОНОМАХ-САПР; выполнить общие расчеты системы методом конечных элементов без учета и с учетом АЖТ в узлах сопряжений колонн и стен с плитами перекрытий; провести сравнительный анализ результатов напряженно-деформированного состояния несущих железобетонных конструкций.

**Результаты исследования.** Для решения поставленных выше задач и проведения всестороннего исследования железобетонных конструкций была использована созданная ранее в специализированном программном комплексе ПК МОНОМАХ-САПР пространственная модель высотного жилого комплекса [3; 4]. Монолитная конструктивная система здания состоит из фундаментной плиты, центрального ядра жесткости, колонн, стен,

плит перекрытий и покрытия, которые работают под нагрузкой совместно. Расчетная пространственная модель здания включает все несущие конструктивные элементы. Плиты перекрытий и покрытия, стены и фундаментная плита представлены в расчетной схеме элементами плоской оболочки, колонны – стержневыми конечными элементами. Сопряжения стержневых элементов колонн с элементами плит перекрытий этажей (-2 ÷ 25) моделируем с использованием абсолютно твердых тел, реализующих кинематическую гипотезу о недеформируемых поперечных сечениях колонн. Такой подход позволяет получать более корректные результаты при определении усилий и армирования в опорных зонах плит, так как смягчает нежелательный эффект сингулярности, свойственный методу конечных элементов.

Генерация абсолютно жестких тел для вертикальных несущих элементов в некоторой степени компенсирует погрешности, вносимые упрощениями физической модели, принятыми при построении расчетной схемы. Наиболее важные преимущества использования АЖТ – срезание пиков моментов на опорах и уменьшение пролетов плиты.

Проведены исследования пространственной модели конструктивной системы высотного здания без учета и с учетом АЖТ в ПК МОНОМАХ-САПР. В процессе МКЭ расчета абсолютно жесткие тела генерируются автоматически для тех колонн и стен, которым назначено свойство «Генерировать АЖТ». Сечение колонны может быть любой формы (круглое, квадратное, тавровое, крестовое и др.).

Перед выполнением расчета в окне диалога «МКЭ расчет» дополнительно отмечается флажок «Генерировать АЖТ колонн и стен, имеющих такое свойство» [5]. В местах примыкания наблюдаются некоторые сгущения и уплотнения сетки конечных элементов в плите (рис. 1).

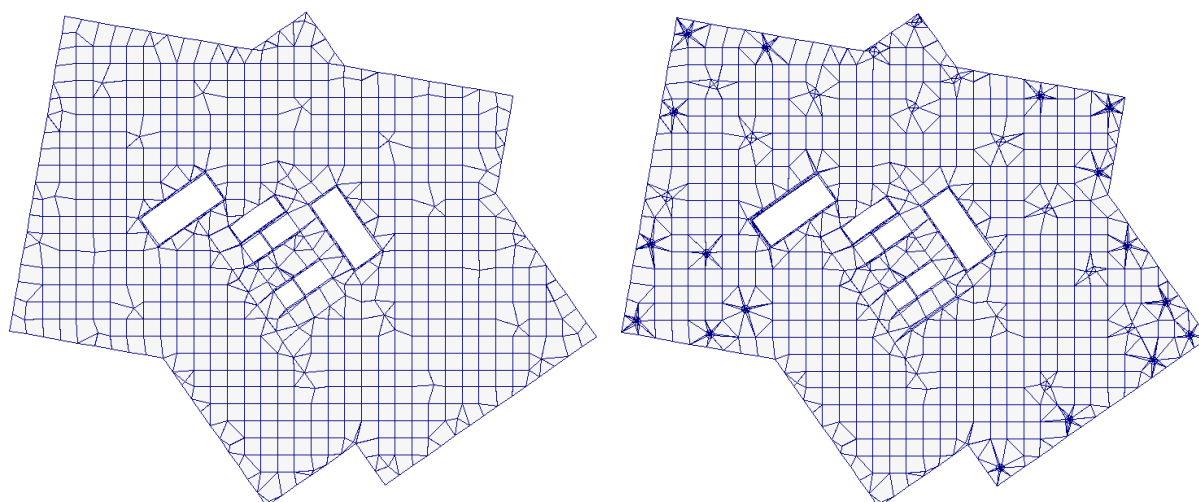


Рис. 1. Сетка конечных элементов плиты перекрытия 11-го этажа:  
слева – без учета АЖТ, справа – с учетом АЖТ.

В таблице 1 представлено сравнение результатов вертикальных перемещений плит перекрытий при линейном расчете конструктивной системы без учета (ЛР) и с учетом АЖТ (ЛР, АЖТ) для колонн и стен. Расчет производился для сочетания нагрузок (постоянное + длительное + ветер 1). Анализируя результаты, приведенные в данной таблице, можно отметить, что максимальные значения перемещений уменьшились во всех плитах перекрытий -2 ÷ 25 этажей. Относительное отклонение данных значений невелико и не превышает 2,91%. Минимальные перемещения также изменились в пределах 2 – 3%, однако нельзя сказать однозначно в какую сторону. До 17-го этажа (включительно) перемещения увеличивались, а начиная с 18-го этажа уменьшались. Такая зависимость может быть обусловлена изменением конфигурации и пролетов плит перекрытий верхних этажей.

Таблица 1

**Сравнение результатов вертикальных перемещений плит перекрытий для моделей без учета и с учетом АЖТ для колонн и стен**

Этаж	Перемещения по Z, мм (ЛР)		Перемещения по Z, мм (ЛР, АЖТ) и отклонение %			
	max	min	max	отклонение, %	min	отклонение, %
1	2	3	4	5	6	7
-2	81,40	26,20	80,10	1,62	26,30	0,38
-1	82,80	23,30	81,50	1,60	23,60	1,27
1	83,10	24,00	81,80	1,59	24,10	0,41
2	84,80	23,70	83,10	2,05	24,00	1,25
3	86,30	54,40	85,50	0,94	55,40	1,81
4	87,30	55,70	86,30	1,16	56,80	1,94
5	88,50	56,50	87,60	1,03	57,80	2,25
6	89,70	57,30	88,70	1,13	58,70	2,39
7	90,90	58,10	89,80	1,22	59,50	2,35
8	92,00	58,70	91,00	1,10	60,30	2,65
9	93,10	59,30	92,00	1,20	60,90	2,63
10	94,20	59,80	93,10	1,18	61,40	2,61
11	95,10	60,10	94,00	1,17	61,90	2,91
12	96,00	60,40	95,00	1,05	62,20	2,89
13	97,00	60,70	95,90	1,15	62,50	2,88
14	97,40	60,90	96,30	1,14	62,70	2,87
15	98,20	60,50	97,10	1,13	62,40	3,04
16	99,10	73,10	97,50	1,64	74,20	1,48
17	100,00	72,60	98,40	1,63	73,70	1,49
18	101,00	80,70	99,20	1,81	79,80	1,13
19	102,00	81,00	99,90	2,10	80,00	1,25
20	102,00	80,30	101,00	0,99	79,40	1,13
21	106,00	82,70	103,00	2,91	81,90	0,98
22	103,00	83,10	102,00	0,98	82,30	0,97
23	103,00	83,50	102,00	0,98	82,60	1,09
24	103,00	83,70	102,00	0,98	82,90	0,97
25	103,00	83,60	102,00	0,98	82,80	0,97

Влияние введения абсолютно жестких тел на изменение значений изгибающих моментов в плитах перекрытий всех этажей (-2 – 25) удобнее всего представить в виде графиков (рис. 2 – 5). На рисунках 2 и 3 представлено сравнение экстремумов опорных моментов  $M_x$  и  $M_y$ , а на рисунках 4 и 5 – пролетных моментов в плитах при линейном расчете (ЛР) без учета и с учетом абсолютно жестких тел (ЛР, АЖТ) от основного сочетания нагрузжений (постоянное + длительное + кратковременное + ветер 1).

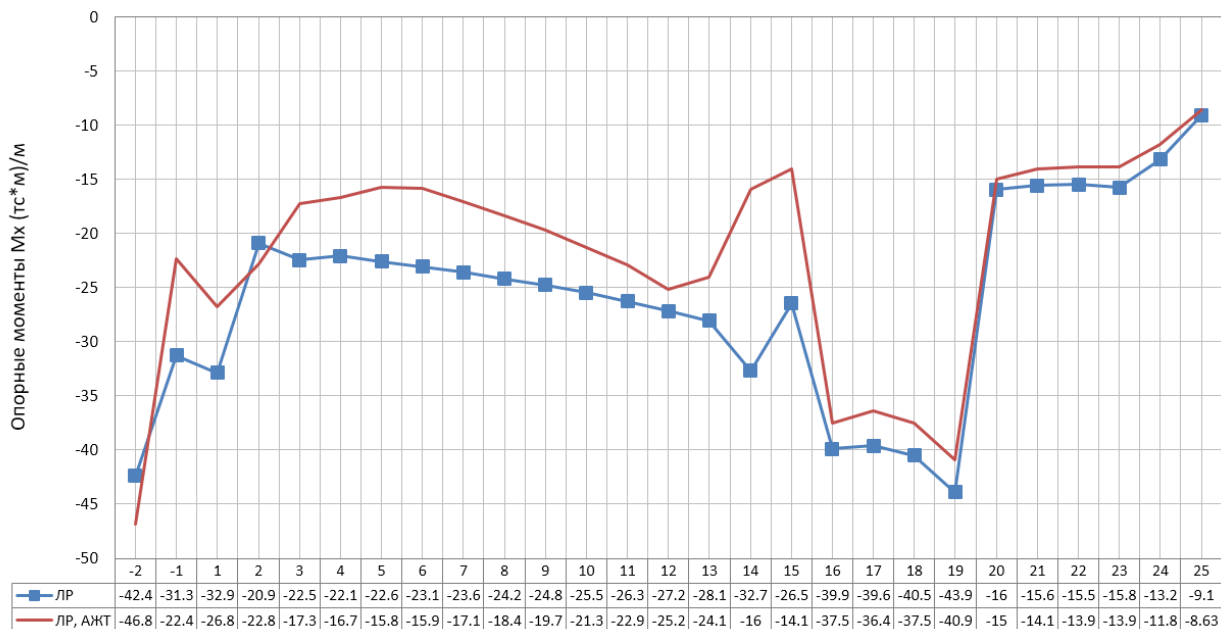


Рис. 2. Сравнение опорных моментов  $M_x$  в плитах при расчете без учета и с учетом абсолютно жестких тел.

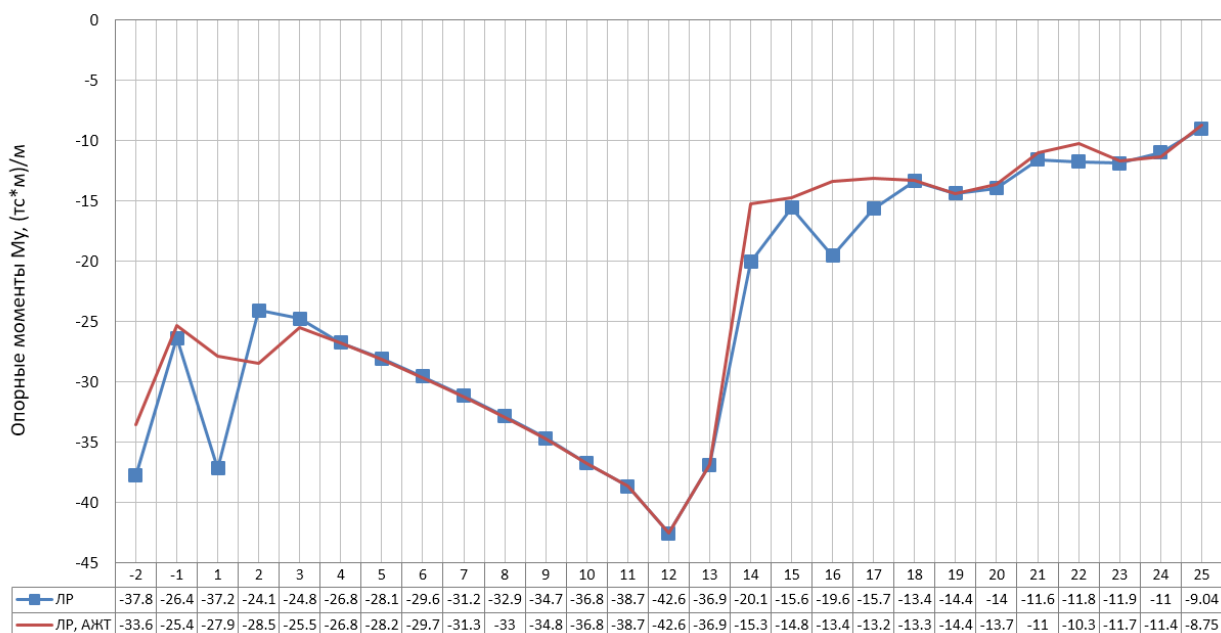


Рис. 3. Сравнение опорных моментов  $M_y$  в плитах при расчете без учета и с учетом абсолютно жестких тел.

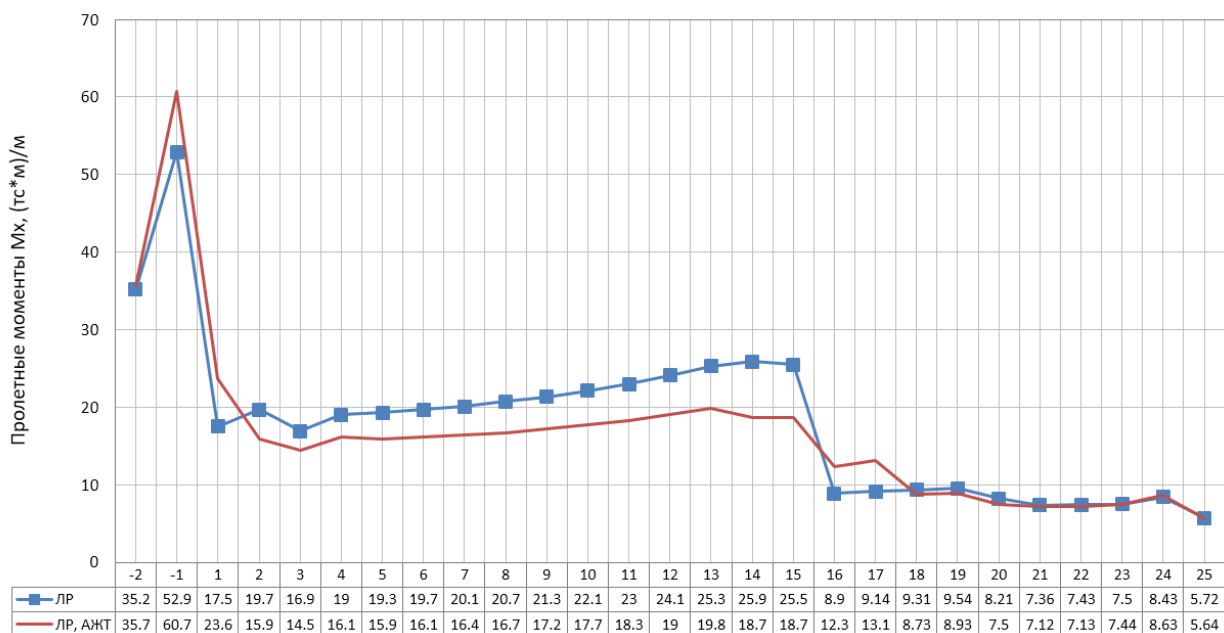


Рис. 4. Сравнение пролетных моментов  $M_x$  в плитах при расчете без учета и с учетом абсолютно жестких тел.

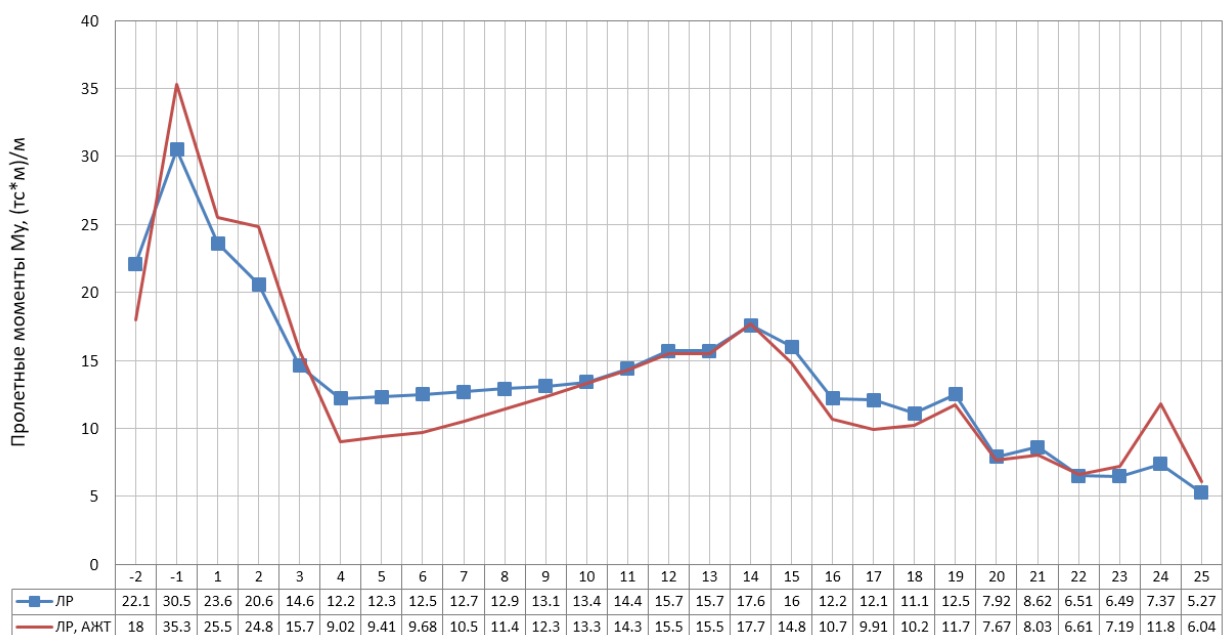


Рис. 5. Сравнение пролетных моментов  $M_y$  в плитах при расчете без учета и с учетом абсолютно жестких тел.

Анализ полученных результатов в большей степени подтвердил теоретические предположения об уменьшении изгибающих моментов в пролетах плит перекрытий и сглаживании пиков опорных моментов при введении АЖТ. Сравнение экстремумов изгибающих моментов показало, что снижение  $M_x$  в опорной зоне значительное и в некоторых случаях достигает 50 %, а в пролетах – 28 %.

Рассмотрим, как введение АЖТ повлияло на результаты расчета самых нагруженных колонн нижнего этажа. На рисунке 6 показаны номера колонн на фрагменте плана здания и

проценты армирования сечений до и после введения АЖТ соответственно. Результаты определения усилий в сечениях колонн представлены в таблице 2.

Анализ результатов проведенного расчета показал, что в рассматриваемых колоннах 1\_95 (К2), 1\_103 (К3) и 1\_54 (К1) проценты армирования снизились. В колонне 1\_70 (К4) процент армирования остался неизменным. Во всех выбранных колоннах уменьшилось значение продольной силы.

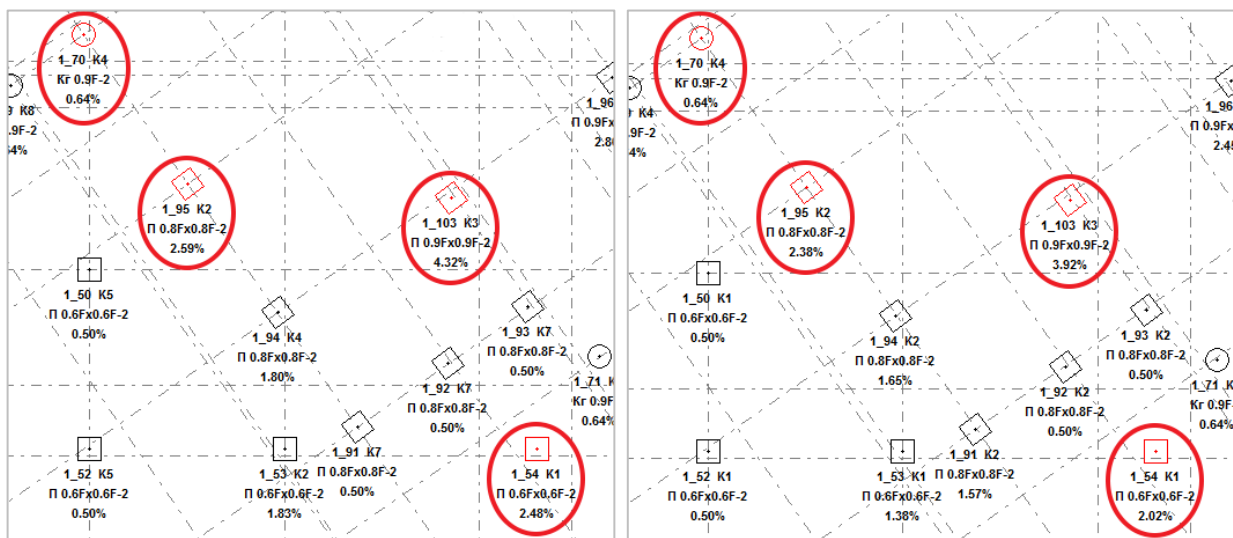


Рис.

Рис. 6. Колонны на плане здания и проценты армирования сечений до (слева) и после введения АЖТ (справа).

Таблица 2

### Сравнение результатов расчета для колонн нижнего этажа без учета и с учетом АЖТ при постоянном нагружении

Колонна	N, т			M <sub>y</sub> , т*м			M <sub>z</sub> , т*м			μ, %		
	ЛР	АЖТ	Δ, %	ЛР	АЖТ	Δ, %	ЛР	АЖТ	Δ, %	ЛР	АЖТ	Δ, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
21	12,2	19,3	36,8	10,7	10,0	7,0	17,7	17,7	0,0	1,3	1,1	16,2
23	99,9	99,6	0,3	45,9	43,7	5,0	9,7	9,1	6,6	0,6	0,5	11,3
24	25,8	9,8	163,3	15,0	17,4	13,8	10,8	10,2	5,9	1,6	1,5	6,9
41	906,2	895,3	1,2	4,1	3,2	28,1	53,3	58,3	8,6	1,0	1,0	5,8
51	43,7	49,8	12,3	42,3	39,8	6,3	38,7	36,6	5,7	0,8	0,7	10,8
53	19,6	35,2	44,3	69,7	64,3	8,4	30,4	30,4	0,0	1,8	1,4	32,6
54	61,4	35,0	75,4	65,7	61,2	7,4	12,7	12,1	5,0	2,5	2,0	22,8
55	60,4	74,6	19,0	50,7	46,1	10,0	25,6	24,5	4,5	0,8	0,6	33,3
57	58,8	92,9	36,7	18,8	21,3	11,7	47,2	21,3	121,6	0,9	0,5	62,3
58	42,5	104,5	59,3	5,5	26,6	79,3	63,2	60,1	5,2	1,6	1,2	32,8
59	53,5	56,0	4,5	28,7	29,3	2,1	68,3	62,8	8,8	1,4	1,2	13,2
60	33,4	41,1	18,7	23,7	25,2	6,0	71,9	65,2	10,3	1,6	1,4	17,7
88	1439,9	1307,8	10,1	56,5	61,3	7,8	202,6	208,1	2,6	1,0	0,6	66,1
89	1384,4	1152,4	20,1	120,9	123,1	1,8	177,0	188,6	6,2	0,6	0,5	16,0
94	1667,3	1623,7	2,7	122,5	133,2	8,0	176,1	179,7	2,0	1,8	1,7	9,1
95	1819,4	1729,0	5,2	75,6	83,0	8,9	202,5	215,9	6,2	2,6	2,4	8,8
96	2335,9	2223,3	5,1	344,3	328,4	4,8	92,2	90,0	2,4	2,9	2,5	16,7
98	1446,4	1316,7	9,9	37,2	36,5	1,9	210,1	217,5	3,4	1,1	0,8	50,7
103	2478,8	2395,5	3,5	457,9	439,0	4,3	134,3	129,3	3,9	4,3	3,9	10,2

**Выводы.** На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. В программном комплексе МОНОМАХ-САПР реализована возможность проведения сложного расчета пространственных моделей высотных зданий с автоматической генерацией абсолютно жестких тел в местах примыкания колонн и стен к плитам перекрытий. Функционал комплекса позволяет без особых трудностей и за достаточно короткий промежуток времени получить необходимые результаты расчета. Однако не для всех конструкций выполняется автоматическая генерация АЖТ. Можно предположить, что влияет расположение колонн или стен на плане. Так, например, АЖТ не удалось назначить для колонн, расположенных у контура плиты или в угловых зонах. АЖТ не сгенерировались для стен, расположенных вокруг отверстий в плитах. Но, если вышеизложенные факты еще можно понять, то сложно объяснить частные случаи для некоторых колонн, расположенных внутри здания;

2. Подтверждена гипотеза о снижении экстремумов значений изгибающих моментов как на опорах, так и в пролетах плит перекрытий всех этажей, что в конечном итоге позволит конструировать данные плиты экономичнее, чем по результатам расчета модели без введения абсолютно жестких тел;

3. В колоннах нижнего этажа с генерацией АЖТ внутренние усилия перераспределяются, а в самых нагруженных колоннах снижаются продольные силы и проценты армирования сечений. Таким образом, можно однозначно сказать, что введение абсолютно жестких тел при моделировании пространственной расчетной схемы высотного здания очень эффективно. Реализация этого приема позволяет получить более точную картину напряженно-деформированного состояния и экономичные решения для несущих конструкций здания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций. – М.: АСВ, 2009. – 344 с.
2. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография. – К.: Сталь, 2014. – 301 с.
3. 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-monolitnyx-zhelezobetonnyx-plit-perekrytij-vysotnogo-zhilogo-kompleksa-s-primeneniem-pk-monomax-sapr> (дата обращения 18.04.2021).



4. Уткина В. Н., Грязнов С. Ю., Бабушкина Д. Р. Оценка надежности монолитных железобетонных плит перекрытий высотного жилого комплекса // Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций: материалы XI Академических чтений РААСН – Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти первого Председателя Научного Совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов», Почетного члена РААСН, д.т.н., проф. Зайцева Ю. В. / редкол.: В. И. Травуш, В. П. Селяев, П. А. Акимов [и др.]; отв. ред. А. Л. Лазарев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2020. – С. 325–336.
5. 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.