

Анализ напряженно-деформированного состояния вариантов моделирования схем железобетонной рамы и их сравнение с результатами испытаний

А.А. Ем, П.И. Егоров

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск

Аннотация: В данной работе представлен анализ и выводы, полученные в результате моделирования железобетонной рамы различными вариантами расчетных схем. Выводы были сопоставлены с результатами испытаний аналогичной рамы в ином исследовании.

Ключевые слова: линейный расчет, нелинейный расчет, рамы, железобетон, прогибы, моделирование, расчётная схема, стержневые элементы, пластинчатые элементы, объёмные конечные элементы.

Введение

Корректный выбор расчетной схемы является фундаментом для объективной инженерной оценки прочностных характеристик, устойчивости и деформативности здания. В монолитных конструкциях элементы типа пилонов и стен могут моделироваться различными способами в зависимости от уровня детализации: в виде стержневых элементов (в рамках упрощённых расчетных моделей), пластинчатых конечных элементов либо объёмных конечных элементов (при создании детализированных конечно-элементных моделей).

От принятой расчетной схемы напрямую зависит точность определения внутренних усилий, корректность учета пространственного взаимодействия конструктивных элементов, достоверность оценки поведения здания при сейсмических или ветровых воздействиях, а также возможности по оптимизации армирования и снижению материалоёмкости конструкции.

Особое значение корректный выбор расчетной схемы приобретает при проектировании высотных зданий и объектов, расположенных в сейсмоопасных районах. В таких условиях система «пилоны + стены + ядро жёсткости» выполняет ключевую функцию в обеспечении пространственной устойчивости сооружения. Для адекватного учёта совместной работы

элементов необходима точная настройка расчетной модели: даже незначительные упрощения, такие как игнорирование взаимодействия стен и перекрытий, могут существенно исказить результаты расчёта.

Анализ публикаций по данной тематике показывает, что ранее данная проблема рассматривалась в ограниченном числе работ. В частности, в [1] исследовалась арочная конструкция из клееной древесины, в то время как в [2] — железобетонные колонны. Отдельные экспериментальные исследования были посвящены железобетонным каркасам в различных условиях эксплуатации [3,4], а также ригелям [5]. Исследования, непосредственно касающиеся железобетонных рам, представлены в ряде работ [6–8], однако их охват и глубина анализа остаются ограниченными.

Таким образом, грамотно сформированная расчетная схема обеспечивает: достоверную оценку несущей способности конструктивных элементов; рациональное распределение армирования; предотвращение избыточного запаса прочности и нецелесообразного расхода материалов; повышение эффективности проектных решений и оптимизацию строительного процесса в целом.

Цели и задачи

Цель исследования заключается в выработке рекомендаций для проектирования монолитных рамных конструкций.

Описание рамы

Моделируемая железобетонная однопролетная рама с длиной пролета 2м между осевыми линиями. Армирование в стойках и ригеле выполнено в соответствии с рис. 1.

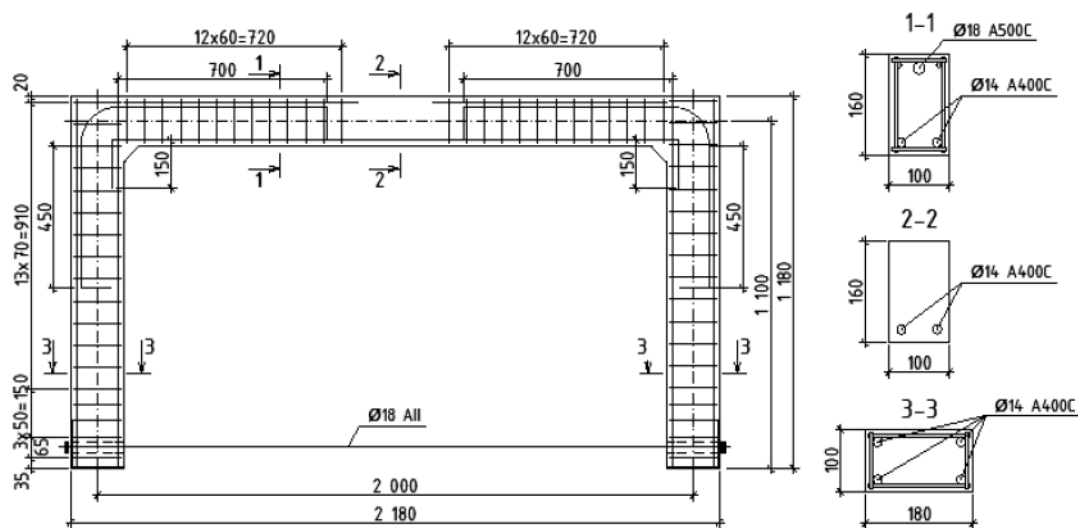


Рис. 1. – Конструктивная схема рамы

Описание модели

Расчетные модели представлены на рис. 2-4. Выполнены в 3 вариантах – из стержневых конечных элементов (далее КЭ), пластинчатых КЭ и объемных. Вариант расчетной схемы их пластинчатых КЭ рассматривался в двух вариантах – армирование учитывалось посредством стержневых КЭ и вариант, где армирование учитывалось приведенным модулем упругости.

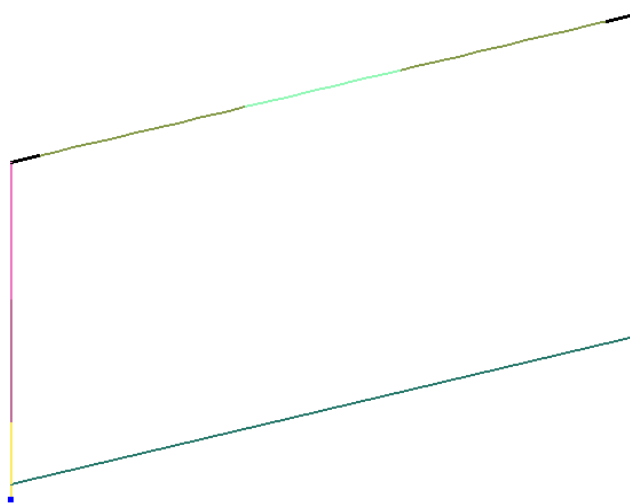


Рис. 2. – Стержневая расчётная модель

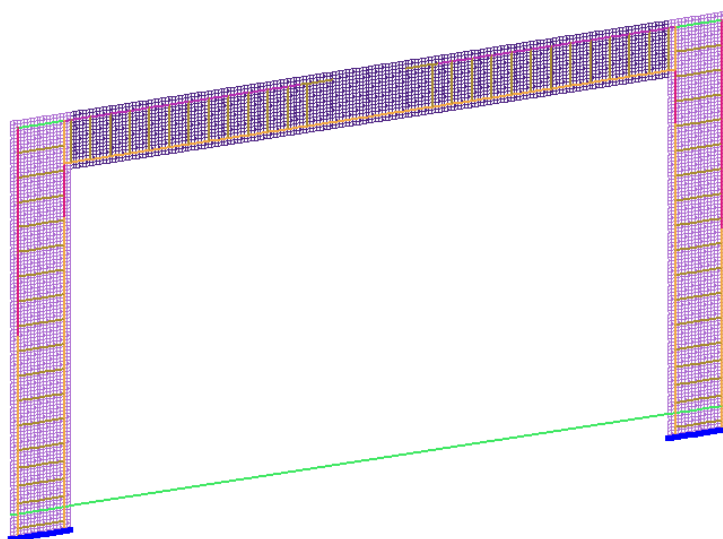


Рис. 3. – Расчетная модель из пластинчатых КЭ

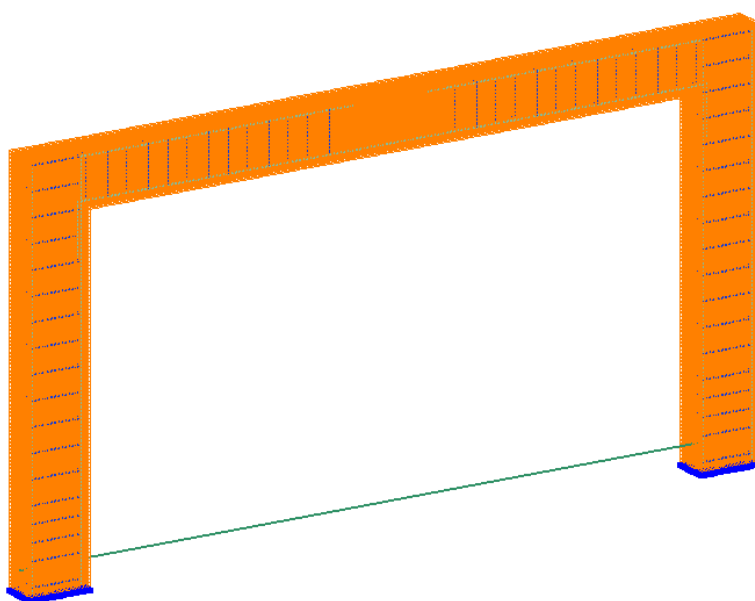


Рис. 4. – Расчетная модель из объемных КЭ

По всем расчетным моделям было произведено два типа расчета – в линейной постановке и с учетом физической нелинейности [9].

В стержневой расчетной схеме в ригеле были использованы жесткие вставки на величину половины стойки, длина стержневого КЭ составила

0,01м, в расчетной схеме с использованием пластин размеры пластинчатого КЭ 0,01x0,01м, из объемных КЭ элементов 0,01x0,01x0,01м.

Нагрузка в расчетных схемах прикладывалась в местах аналогичных схеме испытания рамы [10] (рис. 5).

Схемы нагружались нагрузкой от 5кН до 55кН включительно с шагом равным 5кН. Также в ходе расчетов вычислялась нагрузка обрушения схем и сравнивалась с нагрузкой обрушения рамы в результатах испытания. Предварительное напряжение в расчетных схемах создавалась с помощью металлического стержня аналогичного диаметра и приложением нагрузки к нему равной 1кН с двух концов. Напряжения в расчетных схемах измерялись в четырех участках, изображенных на рис. 6. Результаты расчетов представлены в виде таблиц 1-7.

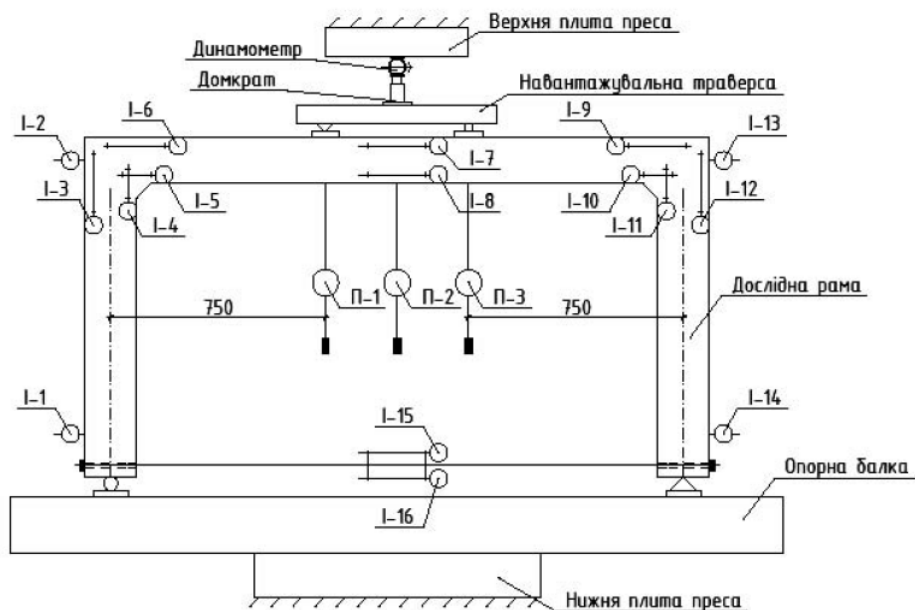


Рис. 5. – Схема испытания рамы

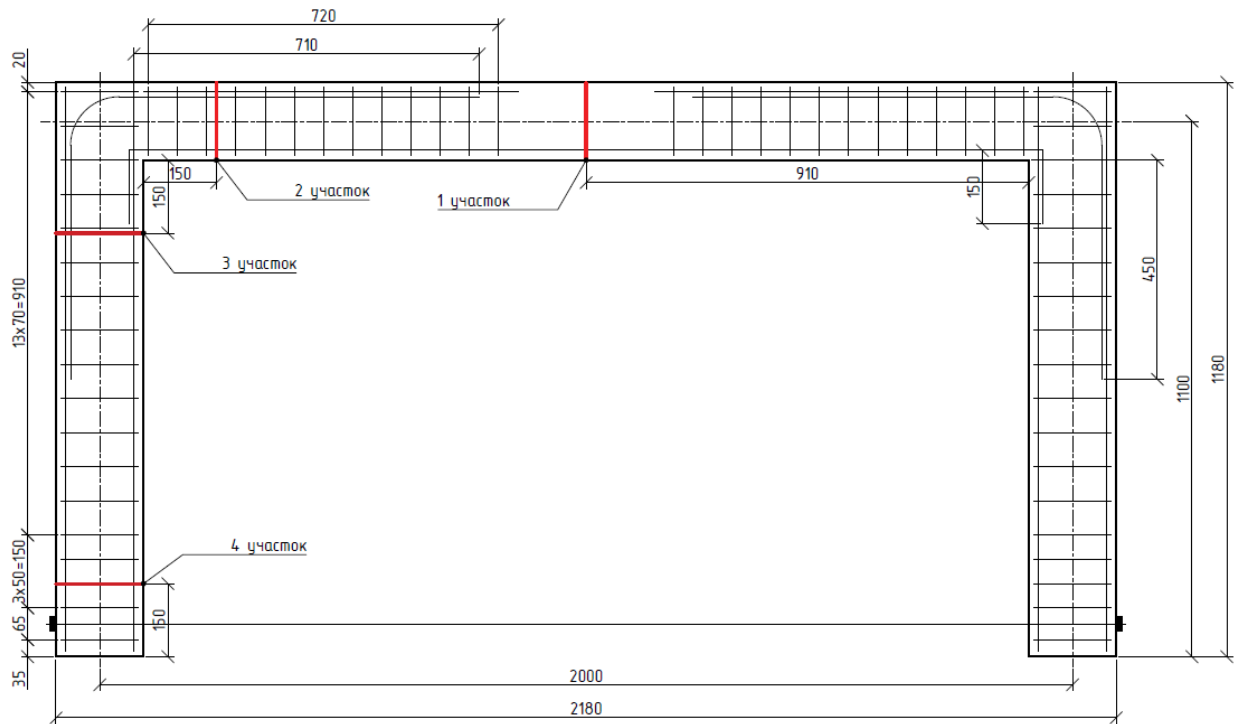


Рис. 6. – Схема с расположением участков снятия напряжений

Таблица № 1

Прогиб ригеля рамы, мм

F, кН	РКР-1	Стержни	Стержни N	Пластины	Пластины (арм. Пластин)	Пластины N	Пластины N (арм. Пластин)	Объем.	Объем N
5	-0,3	0,749	0,292	0,599	0,870	0,302	0,318	0,548	0,312
10	0,6	1,44	0,64	1,15	1,66	0,6051	0,716	1,05	0,656
15	1,3	2,13	1,07	1,69	2,46	1,12	1,37	1,55	1,06
20	2	2,82	1,5	2,24	3,26	1,72	2,57	2,06	1,51
25	3	3,51	1,93	2,8	4,05	2,48	4,40	2,56	2,02
30	4,1	4,2	2,43	3,34	4,85	3,42	7,83	3,06	2,58
35	5,5	4,89	3,02	3,88	5,64	5,01	16,20	3,56	3,31
40	6,7	5,59	3,75	4,43	6,44	7,19	—	4,07	3,97
45	7,9	6,28	4,58	4,99	7,23	13,8		4,57	4,9
50	9,3	6,97	5,65	5,53	8,03	—	—	5,07	6,08
55	10,6	7,66	-	6,08	8,82			5,57	7,91

Таблица № 2

Напряжения (положительные) на участке 1, т/м²

F, кН	Стержни	Стержни N	Пластины	Пластины N	Пластины (арм. В пласт.)	Пластины N (арм. В пласт.)	Объем	Объем N
5	178,83	211,61	85,78	92,03	327,85	425,68	81,96	93,55
10	343,26	401,23	164,04	110,96	627,71	957,39	156,83	111,11
15	507,68	586,67	242,30	110,90	927,51	1697,35	231,69	111,16
20	672,11	780,28	320,56	110,93	1227,31	2731,31	306,56	111,32
25	836,54	972,87	398,82	111,75	1527,12	3918,46	381,42	112,10
30	1001,00	1150,24	477,08	112,29	1826,91	5336,52	453,94	112,94
35	1165,40	1320,84	555,34	114,99	2126,71	6935,66	531,15	114,80
40	1329,80	1477,13	633,60	116,72	2426,52	–	606,01	116,74
45	1494,20	1633,17	711,86	123,27	2726,32		680,88	127,61
50	1658,70	1768,91	791,00	–	3026,12		755,74	139,99
55	1823,10	–	869,26		3325,93		830,60	152,37

Таблица № 3

Напряжения (отрицательные) на участке 1, т/м²

F, кН	Стержни	Стержни N	Пластины	Пластины N	Пластины (арм. В пласт.)	Пластины N (арм. В пласт.)	Объем	Объем N
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	194,53	211,61	176,23	202,84	191,23	205,63	166,99	208,37
10	372,93	401,23	336,08	387,52	364,85	402,17	318,41	392,39
15	551,33	586,67	495,92	582,32	538,48	635,08	469,84	568,89
20	729,73	780,28	655,76	775,52	712,12	903,97	621,26	736,02
25	908,13	972,87	815,61	949,33	885,75	1095,07	772,68	880,96
30	1086,50	1150,24	975,44	1069,89	1059,38	1143,78	924,10	994,99
35	1264,90	1320,84	1135,29	1120,88	1233,01	1857,01	1075,52	1074,74
40	1443,30	1477,13	1295,13	1118,12	1406,65	–	1226,94	1113,56
45	1621,70	1633,17	1454,97	1131,58	1580,28		1378,36	1118,96
50	1800,10	1768,91	1616,63	–	1753,92		1529,79	1124,70
55	1978,50	–	1776,47	–	1927,55		–	1681,21

Таблица № 4

Напряжения (положительные) на участке 2, т/м²

F, кН	Стержни	Стержни N	Пластины	Пластины N	Пластины (арм. В пласт.)	Пластины N (арм. В пласт.)	Объем.	Объем. N
5	133,80	120,72	28,05	49,06	188,68	192,19	29,18	43,68
10	256,45	235,82	53,56	79,72	360,90	412,39	55,54	73,13
15	213,65	355,10	79,06	95,84	533,11	621,20	81,91	92,26
20	501,77	466,21	104,56	104,14	705,33	746,64	108,28	102,78
25	624,42	578,34	130,07	107,51	877,55	913,13	134,64	107,67
30	747,07	705,68	168,23	108,88	1049,76	1081,03	161,01	109,89
35	869,73	839,80	181,07	108,74	1221,98	1373,84	187,38	110,74
40	992,38	988,24	206,58	109,81	1394,20	-	213,74	110,86
45	1115,00	1136,91	232,08	109,01	1566,41		240,11	111,17
50	1237,70	1305,90	257,77	-	1738,63		266,47	110,88
55	1360,40	-	283,27		1910,85		292,84	110,96

Таблица № 5

Напряжения (отрицательные) на участке 2, т/м²

F, кН	Стержни	Стержни N	Пластины	Пластины N	Пластины (арм. В пласт.)	Пластины N (арм. В пласт.)	Объем.	Объем. N
5	149,45	120,72	38,37	73,37	225,43	219,37	44,89	70,39
10	286,04	235,82	72,79	140,42	429,00	432,62	84,88	137,47
15	422,63	355,10	107,22	192,75	632,57	567,60	124,87	205,81
20	559,22	466,21	141,65	221,89	836,15	531,00	164,86	271,57
25	695,81	578,34	176,08	227,27	1039,72	450,14	204,85	332,22
30	832,39	705,68	222,90	233,59	1243,29	389,06	244,84	388,01
35	968,98	839,80	244,93	243,26	1446,86	361,33	284,83	442,38
40	1105,60	988,24	279,35	306,54	1650,44	-	324,82	498,27
45	1242,20	1136,91	313,78	390,65	1854,01		364,81	561,50
50	1378,70	1305,90	348,50	-	2057,58		404,80	636,23
55	1515,30	-	382,93		2261,16		444,78	719,44

Таблица № 6

Напряжения (положительные) на участке 3, т/м²

F, кН	Стержни	Стержни N	Пластинны	Пластинны N	Пластинны (арм. В пласт.)	Пластинны N (арм. В пласт.)	Объем.	Объем. N
5	167,74	173,01	28,61	53,25	384,27	315,76	60,51	58,98
10	319,13	330,56	54,43	83,15	733,40	652,79	111,71	90,18
15	470,53	490,66	80,25	98,74	1082,53	946,74	164,57	105,17
20	621,93	645,79	106,06	106,48	1431,67	1102,67	217,44	110,59
25	773,33	801,53	131,88	110,20	1780,81	1227,67	270,30	111,06
30	924,72	966,54	157,70	110,82	2129,93	1360,44	323,17	111,43
35	1076,10	1135,69	183,51	110,99	2479,06	1547,54	376,03	111,67
40	1227,50	1313,56	209,33	110,56	2828,19	—	428,90	111,79
45	1378,90	1491,58	235,43	111,15	3177,33		481,76	111,83
50	1530,30	1681,97	261,24	—	3526,46		534,63	112,22
55	1681,70	—	287,06		3875,59		587,49	112,35

Таблица № 7

Напряжения (отрицательные) на участке 3, т/м²

F, кН	Стержни	Стержни N	Пластинны	Пластинны N	Пластинны (арм. В пласт.)	Пластинны N (арм. В пласт.)	Объем.	Объем. N
5	201,83	173,01	54,24	102,10	456,06	327,87	84,51	106,82
10	381,56	330,56	101,68	189,82	857,55	634,52	165,93	201,47
15	561,30	490,66	149,12	270,49	1259,03	903,79	245,66	294,97
20	741,03	645,79	196,55	346,71	1660,52	1089,34	323,84	384,52
25	920,77	801,53	243,99	412,68	2062,01	1250,01	402,01	468,07
30	1100,50	966,54	291,43	484,10	2463,48	1405,77	480,19	544,12
35	1280,20	1135,69	338,86	544,46	2864,97	1595,16	558,36	615,18
40	1460,00	1313,56	386,30	625,30	3266,46	—	636,54	683,09
45	1639,70	1491,58	434,42	768,05	3667,95		714,72	752,56
50	1819,40	1681,97	481,86	—	4069,44		792,89	820,63
55	1999,20	—	529,29		4470,92		871,07	887,71

Таблица № 8

Напряжения (положительные) на участке 4, т/м²

F, кН	Стержни	Стержни N	Пластины	Пластины N	Пластины (арм. В пласт.)	Пластины N (арм. В пласт.)	Объем.	Объем. N
5	2,85	20,26	4,35	14,70	46,10	-0,118	10,30	17,30
10	9,09	39,69	6,74	24,70	86,10	82,20	16,80	30,00
15	15,33	59,43	9,13	37,60	126,00	152,00	23,40	43,40
20	21,58	78,56	11,50	51,30	166,00	277,00	30,00	56,10
25	38,32	97,76	13,90	65,00	206,00	454,00	36,50	67,20
30	34,06	118,11	16,30	76,20	246,00	710,00	43,10	76,40
35	40,30	138,96	18,70	90,20	286,00	1050,00	49,70	83,60
40	46,54	160,89	21,10	98,80	326,00	—	56,20	89,30
45	52,79	182,84	23,50	109,00	366,00		62,80	93,60
50	59,03	206,30	25,80	—	406,00		69,40	96,70
55	65,27	—	28,20	—	446,00		75,90	98,90

Таблица № 9

Напряжения (отрицательные) на участке 4, т/м²

F, кН	Стержни	Стержни N	Пластины	Пластины N	Пластины (арм. В пласт.)	Пластины N (арм. В пласт.)	Объем.	Объем. N
5	40,55	20,26	22,90	45,30	181,00	1,99	33,80	46,70
10	75,12	39,69	40,20	80,30	323,00	266,00	57,30	80,50
15	109,69	59,43	57,60	119,00	464,00	414,00	81,00	117,00
20	144,26	78,56	74,90	161,00	606,00	610,00	105,00	154,00
25	189,28	97,76	92,20	203,00	747,00	839,00	128,00	191,00
30	213,40	118,11	110,00	243,00	888,00	1100,00	152,00	227,00
35	247,96	138,96	127,00	292,00	1030,00	1380,00	176,00	262,00
40	282,53	160,89	144,00	333,00	1170,00	—	199,00	295,00
45	317,10	182,84	162,00	389,00	1310,00		223,00	326,00
50	351,67	206,30	179,00	—	1460,00		247,00	354,00
55	386,24	—	196,00	—	1600,00		271,00	377,00

Заключение

На основании результатов численного моделирования установлено, что среди расчетных схем, выполненных в линейной постановке, наибольшее соответствие экспериментальным прогибам демонстрирует стержневая модель. Однако при увеличении нагрузки она недооценивает прирост прогиба по сравнению с данными эксперимента.

Среди моделей, реализованных в нелинейной постановке, наилучшее совпадение с экспериментальными результатами получено для расчетной схемы, построенной на основе объемных конечных элементов. В то же время схемы, составленные из пластинчатых и стержневых элементов в нелинейной формулировке, продемонстрировали обрушение рамы при нагрузках, меньших по сравнению с экспериментальной. Установлены следующие значения разрушающих нагрузок: для схемы из пластин с реализацией армирования в виде встроенных пластин — 45 кН; для пластин с заданием армирования стержнями — 35 кН; для стержневой модели — 55 кН; для объемной схемы — 62,4 кН, при этом экспериментальное значение составило 62,1 кН.

Анализ прогибов показал, что наибольшее приближение к деформативной модели опытного образца достигается в объемной расчетной схеме, реализованной в нелинейной постановке. По результатам анализа напряжений выявлено, что во всех моделях, за исключением пластинчатой, наблюдается схожая тенденция распределения напряжений.

Таким образом, можно заключить, что применение нелинейной постановки позволяет получить более достоверные расчетные результаты по сравнению с линейной формулировкой. При воздействии высоких и предельных нагрузок моделирование с использованием объемных конечных элементов в нелинейной постановке является наиболее обоснованным и позволяет в наибольшей степени отразить реальное поведение конструкций.

Литература

1. Фурсов В.В., Пурязданхах М., Бидаков А.Н. Сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований натурной арки из клееной древесины // Инженерный вестник Дона. - 2013. - №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2395.
2. Мкртчян А.М., Маилян Д.Р. Особенности расчёта железобетонных колонн из высокопрочного бетона по деформированной схеме // Инженерный вестник Дона. - 2013. - №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2186.
3. Алькади С.А., Демьянов А.И., Осовских Е.В. Экспериментальные исследования живучести фрагмента каркаса здания с железобетонными составными элементами, работающими на изгиб с кручением // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - 2017. - №5. - С. 72-80.
4. Omid Rashidian, Reza Abbasnia, Rasool Ahmadi, Foad Mohajeri Progressive Collapse of Exterior Reinforced Concrete Beam–Column Sub-assemblages: Considering the Effects of a Transverse Frame // International Journal of Concrete Structures and Materials. - 2016. - №4. - pp. 479–497.
5. Тамразян А.Г., Орлова М. А. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов с трещинами // Вестник ТГАСУ. - 2015. - №6. - С. 98-105.
6. Колчунов В.И., Прасолов Н.О., Кожаринова Л.В. Экспериментально-теоретические исследования живучести железобетонных рам при потере устойчивости отдельного элемента // Вестник МГСУ. - 2011. - №3. - С. 109-115.
7. Seyed Ali Ekrami Kakhki, Ali Kheyroddin, Alireza Mortezaei Evaluation of the Progressive Collapse of the Reinforced Concrete Frames Considering the Soil–Structure Interaction: Parametric Study Based on the Sensitivity Index // International Journal of Concrete Structures and Materials. - 2022. - №16(38). - pp. 1-24.

8. Sergey Savin, Vitaly Kolchunov, Natalia Fedorova, Ngoc Tuyen Vu Experimental and Numerical Investigations of RC Frame Stability Failure under a Corner Column Removal Scenario // Buildings. - 2023. - №13(4). - pp. 1-23.

9. Евзеров И.Д., Колесников А.В. Современные методы моделирования и расчета зданий и сооружений. - СПб.: ЛИРА-софт, 2015. - С. 36

10. Бабич Е.М., Гайчук И.В. Исследование влияния регулирования усилий в железобетонных рамах на деформации ригеля // Вестник Белорусско-Российского университета. - 2015. - №1(46). - С. 103-110.

References

1. Fursov V.V., Purjazdanhah M., Bidakov A.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2395.

2. Mkrtchjan A.M., Mailjan D.R. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2186.

3. Al'kadi S.A., Dem'janov A.I., Osovskih E.V. Stroitel'naja mehanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. 2017. №5. pp. 72-80.

4. Rashidian Omid, Abbasnia Reza, Ahmadi Rasool, Nav Foad Mohajeri International Journal of Concrete Structures and Materials. 2016. №4. pp. 479–497.

5. Tamrazjan A.G., Orlova M. A. Vestnik TGASU. 2015. №6. pp. 98-105.

6. Kolchunov V.I., Prasolov N.O., Kozharinova L.V. Vestnik MGSU. 2011. №3. pp. 109-115.

7. Kakhki Seyed Ali Ekrami, Kheyroddin Ali, Mortezaei Alireza International Journal of Concrete Structures and Materials. 2022. №16(38). pp. 1-24.

8. Savin Sergey, Kolchunov Vitaly, Fedorova Natalia, Vu Ngoc Tuyen Buildings. 2023. №13(4). pp. 1-23.

9. Evzerov I.D., Kolesnikov A.V. Sovremennye metody modelirovanija i rascheta zdaniy i sooruzhenij. [Modern methods of modeling and calculation of buildings and structures.] SPb.: LIRA-soft, 2015. P. 36



10. Babich E.M., Gajchuk I.V. Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta. 2015. №1(46). pp. 103-110.

Дата поступления: 29.05.2025

Дата публикации: 25.07.2025