УДК 624.04, 004.94

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-2-51-59

© А. И. Гарипов, аспирант

© А. И. Garipov, post-graduate student

© П. А. Пяткин, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: azat.i.garipov@gmail.com, ptkn@mail.ru

© P. A. Pyatkin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)
E-mail: azat.i.garipov@gmail.com,
ptkn@mail.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УЗЛОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

SEISMIC ANALYSIS METHOD OF STEEL STRUCTURES CONNECTIONS

Предложена методика расчета узлов стальных конструкций по результатам расчета стальной конструкции в целом на сейсмическое воздействие линейно-спектральным методом. Методика позволяет достичь равновесия приложенных к узлу сил и моментов, при этом предельные значения внутренних усилий, получаемые по предложенной методике, соответствуют внутренним усилиям, вычисляемым согласно действующим нормам.

Ключевые слова: расчет узлов, расчет на сейсмическое воздействие, стальные конструкции.

The article presents a technique of calculating steel structures connections taking into consideration the results of seismic analysis of steel structure carried out by linear spectral method. This technique allows reaching the equilibrium of forces and moments applied to the connection, wherein extreme internal forces' values received correspond to the internal forces' values obtained according to the currently valid acting construction codes.

Keywords: connection analysis, seismic analysis, steel structures

Введение. Для определения усилий, действующих в элементах стальных конструкций, в наше время практически всегда используют трехмерные (реже — двумерные) стержневые конечно-элементные расчетные схемы [1]. Расчет узлов производят в основном приближенными методами, но при использовании сложных узлов соединения элементов конструкции возникает необходимость более глубокого анализа их НДС, например при помощи детализированной конечно-элементной расчетной модели узла.

Работе конструкций при сейсмическом воздействии в нашей стране посвящено не так много исследований. В основном предметом исследования является поведение конструкции в целом при сейсмическом воздействии [2–5], а также учет взаимодействия здания с основа-

нием [6]. Создание детализированных конечно-элементных расчетных схем весьма трудозатратно. Для этих целей исследователи, как правило, используют расчетный комплекс ANSYS, а их труды посвящены задачам статики [7–8].

Предлагаемая методика расчета состоит из расчета конструкции в целом по стержневой конечно-элементной схеме, сбора нагрузки на элементы узла и исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) узла в отдельной детализированной расчетной схеме, где концы соединяемых элементов, а также детали соединения моделируются плоскими конечными элементами, учитываются реальные условия передачи нагрузки с элемента на элемент и физическая нелинейность.

Принципы составления детализированной расчетной схемы узла. По правилам строительной механики в узле соединения элементов должны выполняться уравнения равновесия сил и моментов, действующих на узел извне (внешних сил и моментов), и возникающих в соединяемых элементах (внутренних сил и моментов) [9]. Так как приложение сосредоточенной нагрузки к пластине в детализированной конечно-элементной модели узла неизбежно приводит к возникновению в этой пластине бесконечно больших усилий [1], нагрузку, действующую на узел извне, лучше всего прикладывать через отдельный элемент, конструкция которого в расчетной схеме будет соответствовать реальной конструкции (например, через опорный столик).

Размер детализированной модели узла определяется длиной свободных концов соединяемых элементов, которая должна быть достаточна для того, чтобы условия передачи нагрузки на свободный конец не влияли на распределение напряжений в узле по принципу Сен-Венана [10]. Внутренние усилия, определяемые по результатам расчета общей расчетной схемы конструкции в сечении, примыкающем к узлу, прикладываются к свободным концам соединяемых элементов в детализированной расчетной схеме узла с соблюдением теоремы о параллельном переносе сил [9]. Для обеспечения геометрической неизменяемости конечно-элементной модели любой из соединяемых элементов узла на свободном конце необходимо закрепить от любых перемещений (с учетом равновесия сил и моментов в узле от выбора закрепленного элемента распределение напряжений не зависит).

Программа IDEA StatiCa Connection позволяет автоматизировать некоторые из обозначенных выше шагов построения отдельной детализированной расчетной схемы узла соединения и может эффективно применяться для расчета узлов металлических конструкций по результатам статических расчетов общей расчетной схемы.

Проблема сбора нагрузок на узел по результатам расчета линейно-спектральным методом. Расчет на сейсмическое воздействие наиболее часто производят линейно-спектральным методом [2, 11], при котором расчетные значения усилий, согласно СП 14.13330.2018, определяются по формуле

$$N_p = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n N_i^2}, \quad (1)$$

где N_i — значения соответствующего усилия по i -й форме колебаний; n — число учитываемых в расчете форм колебаний; знак выбирается по форме с максимальной модальной массой; при корреляции форм колебаний используется формула (5.9) СП 14.13330.2018, которая отличается дополнительным членом под знаком корня.

Равновесие сил и моментов в узле соблюдается для каждой отдельной формы колебаний, вычисляемой в расчетном комплексе (если в узле нет сосредоточенных масс и нагрузок), однако при приложении к узлу результирующих расчетных усилий от сейсмического нагружения равновесие в общем случае не соблюдается, так как при вычислении теряется знак усилий. Действующие нормы предлагают выбирать знак результирующего усилия по форме с максимальной модальной массой, что дает приемлемые для расчета узла результаты при рассмотрении простых конструкций и малом числе рассматриваемых форм колебаний. В некоторых программных комплексах (например, ЛИРА-САПР 2017) знак результирующего усилия принимается по знаку соответствующего усилия в той форме, где это усилие имеет максимальное абсолютное значение. Такой подход имеет те же недостатки, что и нормативный.

Для обеспечения равновесия в узле отдельные формы колебаний можно сложить, однако чем больше форм колебаний учитывается при расчете, тем больше результат простого сложения форм будет отличаться от значения, вычисляемого согласно нормам [11]. Другой способ — приложить усилия, соответствующие отдельной (определяющей) форме колебаний, но увеличенные до расчетных значений. При таком способе деформации узла в каждом нагружении соответствуют какой-либо определенной форме колебаний и весьма сильно отличаются от реальных деформаций узла при динамическом нагружении. В зарубежной практике широко используется метод расчета на сейсмическое воздействие отдельного элемента узла, при котором один элемент узла загружается, а все остальные — закрепляются¹.

¹ IDEA StatiCa Connection Theoretical background. URL: https://www.ideastatica.com/resource/Content/02_Steel/Theoretical_background/Connection%20Theoretical%20Manual_EN_ver_8_1.pdf (дата обращения: 06.03.2020).

НДС элементов узла, получаемое по такому подходу, весьма далеко от реального НДС элементов при динамическом воздействии, так как в закрепленных элементах действуют только те усилия, которые необходимы для уравнивания усилия в рассматриваемом элементе.

Для того чтобы максимально приблизиться к сложному НДС узла при сейсмическом воздействии, одновременно учитывающему различные формы колебаний, но при этом отвечающему условию равновесия сил и моментов в узле, можно предложить методику, изложенную ниже.

Предлагаемая методика. Исходными данными для расчета являются внутренние усилия элементов узла по различным формам колебаний, которые обозначим $N_{i,j,k}$, где i — номер формы колебаний (от 1 до n , где n — количество учитываемых в расчете форм колебаний), j — номер элемента узла (от 1 до m , где m — количество соединяемых элементов), k — номер внутреннего усилия (от 1 до 6). На рис. 1 обозначены внутренние усилия, действующие в сечении элемента. Правило знаков принято аналогично используемому в IDEA StatiCa Connection.

Сопоставим цифровым обозначениям внутренних усилий общепринятые буквенные, пусть

$$\begin{cases} N_{i,j,1} = N_{x,i,j} \\ N_{i,j,2} = V_{y,i,j} \\ N_{i,j,3} = V_{z,i,j} \\ N_{i,j,4} = M_{x,i,j} \\ N_{i,j,5} = M_{y,i,j} \\ N_{i,j,6} = M_{z,i,j} \end{cases}, \quad (2)$$

Рис. 1. Обозначения внутренних усилий

где N_x — продольная сила; V_y — поперечная сила в плоскости xOy ; V_z — поперечная сила в плоскости xOz ; M_x — крутящий момент; M_y — изгибающий момент вокруг оси y (действует в плоскости xOz); M_z — изгибающий момент вокруг оси z (действует в плоскости xOy).

На первом шаге вычисляем определяющие усилия для каждого элемента по формуле

$$N_{d,j,k} = \sum_{i=1}^n |N_{i,j,k}|. \quad (3)$$

Затем для каждого элемента вычисляем расчетные усилия по формуле

$$N_{p,j,k} = \sqrt{\sum_{i=1}^n N_{i,j,k}^2}. \quad (4)$$

Теперь для каждого из внутренних усилий в каждом элементе определяем коэффициент приведения по формуле

$$K_{j,k} = \begin{cases} N_{p,j,k} / N_{d,j,k}, & N_{d,j,k} > 0 \\ 2, & N_{d,j,k} = 0 \end{cases}. \quad (5)$$

Коэффициенты в матрице K для ненулевых внутренних усилий варьируются в пределах от 0 до 1, поэтому по значению «2» коэффициента можно в дальнейшем отбросить лишние комбинации, которые соответствуют нулевым внутренним усилиям.

В матрицу S для каждого усилия в каждом элементе по каждой форме записываем единицу с тем знаком, который имеет соответствующее внутреннее усилие

$$S_{i,j,k} = \begin{cases} 1, & N_{i,j,k} \geq 0 \\ -1, & N_{i,j,k} < 0 \end{cases}. \quad (6)$$

Следующий этап расчета — составление комбинаций усилий по формам колебаний. Для каждого из определяющих усилий составляется две комбинации форм колебаний: в одной из них будет получено расчетное значение усилия с плюсом, а в другой — с минусом. Для записи всех комбинаций форм и соответствующих им коэффициентов приведения используем матрицу F размерностью $6m$ строк на $n + 1$ столбцов. Элементы матрицы определяем по формулам

$$F_{6(j-1)+k,i} = S_{i,j,k}; \quad (7)$$

$$F_{6(j-1)+k,n+1} = K_{j,k}. \quad (8)$$

Из $6m$ комбинаций теперь можно отбросить лишние. В первую очередь отбрасываем комбинации с коэффициентом приведения 2 — они

соответствуют нулевым внутренним усилиям. Затем из каждого набора комбинаций, отличающихся только значением коэффициента приведения, оставляем по одной комбинации с максимальным значением коэффициента приведения по набору. Оставшиеся после фильтрации комбинации записываем в матрицу F_f размерностью n_{loads} строк (где n_{loads} — количество комбинаций после фильтрации) на $n + 1$ столбец.

Для записи результатов введем матрицу $L_{l,j,k}$ (где l — номер комбинации, изменяющийся в пределах от 1 до n_{loads}), элементы которой вычисляем по формуле

$$L_{l,j,k} = \sum_{i=1}^n (N_{i,j,k} F_{f,i} F_{f,i+1}). \quad (9)$$

Матрица L состоит из нагрузок, в которых получены положительные расчетные значения усилий в элементах узла. Если взять элементы матрицы L с обратным знаком, получим нагрузки, в которых реализуются отрицательные расчетные значения усилий в элементах узла.

Для завершения сбора нагрузок на узел необходимо к каждой комбинации добавить усилия от статических нагрузок, действие которых учитывается совместно с действием динамической нагрузки.

Пример применения. Рассмотрим узел соединения полуарки сложного сечения с распорками сложного сечения, связями из круглой трубы и опорным столиком для крепления прогонов из гнутосварной трубы. Общий вид узла с нумерацией элементов представлен на рис. 2, а.

Так как использованию предлагаемого метода сбора нагрузок предшествует расчет конструкции в целом на сейсмическое воздействие, а отличия предлагаемого метода от нормативного проявляются только в сложных расчетных схемах, далее представим необходимые исходные данные для самостоятельной проверки.

Все соединения узла — сварные. Монтажные стыки распорок на высокопрочных болтах находятся близко к узлу соединения, поэтому моделируем их в той же расчетной схеме. Монтажные стыки связей находятся на достаточном удалении от узла, поэтому их не моделируем. Полуарка имеет сварные монтажные стыки, при этом в пределах узла элементы сечения полуарки усилены, поэтому моделируем полуарку двумя элементами расчетной схемы IDEA StatiCa Connection

со вставкой между ними усиливающего элемента, а реальную конструкцию сварных монтажных стыков заменяем условной.

В табл. 1 представлены направляющие углы α (вокруг собственной продольной оси элемента), β (в горизонтальной плоскости), γ (в вертикальной плоскости) для каждого из элементов расчетной схемы.

Расчет конструкции здания в целом произведен в ЛИРА-САПР 2017. Здесь для краткости изложения приведем результаты только по одному сейсмическому нагружению, в котором учтено пять форм колебаний.

В табл. 2 представлены усилия для элементов расчетной схемы по каждой из пяти форм колебаний, которые могут быть использованы для самостоятельной проверки методики. Все промежуточные вычисления в силу их простоты опускаем. Всего в приведенном примере получаем 42 определяющих усилия, из которых после фильтрации получаем 15 расчетных нагрузок. В табл. 2 представлены также результирующие усилия от сейсмического нагружения, вычисленные по алгоритму программы ЛИРА-САПР 2017 (получены из расчетного комплекса), по требованиям СП 14.13330.2018 со знаками, принятыми по форме № 4 (форма с максимальной модальной массой), а также три произвольно выбранных результирующих нагружения, вычисленных по предложенной методике.

Для всех обозначенных выше нагружений в табл. 3 представлены неуравновешенные силы и изгибающие моменты, в том числе абсолютное значение вектора несбалансированных сил и вектора несбалансированных моментов, вычисляемых по формулам

Таблица 1

Направляющие углы элементов

№ элемента	Название элемента (см. рис. 2, а)	$\alpha, ^\circ$	$\beta, ^\circ$	$\gamma, ^\circ$
1	Арка 1	180,0	76,7	10,2
2	Связь 1	0,0	-33,7	-0,4
3	Связь 2	0,0	144,8	-1,1
4	Распорка 1	-11,0	-6,5	5,6
5	Распорка 2	-11,0	169,5	-5,6
6	Опорный столик	0,0	-99,8	78,6
7	Арка 2	180,0	-103,3	-12,1

Таблица 2

Внутренние усилия в элементах

Тип	i	N , кН	V_y , кН	V_z , кН	M_x , кН·м	M_y , кН·м	M_z , кН·м	Тип	i	N , кН	V_y , кН	V_z , кН	M_x , кН·м	M_y , кН·м	M_z , кН·м
Форма 1	1	-865,04	66,65	111,85	26,23	1094,78	10,10	Алгоритм ЛИРА-САПР	1	1480,59	-482,05	169,83	-161,12	-1837,01	-165,35
	2	-510,82	2,99	1,51	-0,87	-11,10	6,35		2	2700,00	-15,09	-5,54	5,53	-19,35	-40,10
	3	-148,36	0,43	-0,62	-1,89	-7,44	2,81		3	1808,39	-9,83	4,16	4,96	21,11	-29,29
	4	133,41	0,21	-16,89	5,27	-185,75	17,92		4	-1063,64	-75,68	66,95	-27,52	356,43	-177,72
	5	-102,57	14,11	-10,77	-12,50	-178,21	18,96		5	796,69	-70,76	63,81	39,40	352,07	-166,13
	6	-7,07	18,88	-10,28	0,00	4,91	9,01		6	15,29	-95,93	23,24	0,00	-11,09	-45,77
	7	-746,77	-0,85	-158,16	28,98	1126,49	36,78		7	1543,29	-114,83	239,67	-214,01	-1891,86	-258,59
Форма 2	1	113,78	1,55	-51,40	-1,34	348,62	-4,27	Согласно СП по форме № 4	1	1480,59	-482,05	169,83	161,12	-1837,01	-165,35
	2	-51,30	-0,03	-0,22	-0,94	-0,06	-0,21		2	2700,00	-15,09	-5,54	-5,53	19,35	-40,10
	3	-115,33	0,03	0,21	-0,57	-0,55	0,34		3	1808,39	-9,83	4,16	-4,96	-21,11	-29,29
	4	-204,62	7,50	-4,38	-1,92	6,10	9,21		4	-1063,64	-75,68	-66,95	-27,52	356,43	-177,72
	5	-153,41	-6,15	-0,94	3,98	0,80	-5,23		5	-796,69	-70,76	63,81	-39,40	352,07	-166,13
	6	-1,91	-4,40	1,63	0,00	-0,78	-2,10		6	-15,29	-95,93	23,24	0,00	-11,09	-45,77
	7	99,79	4,24	39,62	1,97	340,95	7,77		7	-1543,29	-114,83	239,67	214,01	-1891,86	-258,59
Форма 3	1	1151,51	214,21	-110,28	-115,97	-1198,71	71,76	По новой методике 1	1	17,72	506,48	-9,93	-137,54	766,97	169,41
	2	-1115,28	6,57	1,38	3,81	10,82	19,19		2	-2875,51	16,00	5,71	4,33	-10,05	42,05
	3	-897,94	5,66	-2,00	3,84	18,68	14,95		3	-1892,28	9,84	-4,21	2,84	9,40	30,21
	4	653,36	44,21	51,48	11,22	195,26	88,28		4	983,81	76,64	46,20	28,29	-189,54	186,81
	5	656,19	28,98	-26,68	32,41	251,32	84,33		5	554,76	72,20	-64,93	24,99	-100,17	169,32
	6	13,21	41,13	19,73	0,00	-9,41	19,62		6	1,33	98,33	2,76	0,00	-1,31	46,91
	7	1302,00	58,91	164,89	-155,04	-1256,62	138,23		7	434,95	115,21	-20,14	-181,15	750,47	265,54
Форма 4	1	51,16	-396,96	5,30	103,92	-730,08	-129,94	По новой методике 2	1	-908,33	-414,73	81,41	164,11	961,35	-158,86
	2	2267,76	-12,51	-4,72	-3,35	9,29	-32,72		2	2147,15	-12,15	-4,06	-6,38	-3,40	-33,87
	3	1483,47	-7,63	3,40	-2,14	-6,23	-23,71		3	1538,95	-9,08	3,64	-5,70	-18,67	-25,83
	4	-747,18	-58,94	-38,33	-22,55	179,32	-145,37		4	-1047,16	-65,85	-70,44	-23,71	-27,59	-150,63
	5	-394,28	-57,71	55,35	-18,14	105,16	-133,44		5	-846,45	-61,21	49,65	-34,55	-112,39	-149,40
	6	-0,31	-80,24	0,01	0,00	-0,01	-38,28		6	-11,95	-79,05	-12,96	0,00	6,18	-37,71
	7	-273,18	-91,57	23,99	140,50	-722,19	-210,55		7	-1192,94	-108,71	-120,88	213,97	1006,01	-207,01
Форма 5	1	-319,85	156,41	38,74	-31,97	290,86	72,02	По новой методике 3	1	-1145,99	205,31	102,90	2,50	1846,18	68,56
	2	-799,90	4,37	2,04	1,79	-6,95	11,34		2	-1267,31	6,69	3,36	-0,24	-19,26	15,63
	3	-477,48	2,48	-1,14	1,17	-1,41	8,04		3	-668,66	2,47	-1,49	-1,51	-11,01	10,05
	4	294,12	15,61	7,70	9,57	-149,07	47,49		4	159,63	19,18	-13,47	12,22	-354,46	66,38
	5	120,96	24,49	-13,40	-0,80	-134,05	47,90		5	-200,05	30,83	-27,11	-11,89	-336,64	55,81
	6	-2,34	26,41	-6,52	0,00	3,11	12,60		6	-12,21	40,32	-17,59	0,00	8,40	19,24
	7	-210,46	36,24	-55,59	-34,34	305,39	44,86		7	-950,68	36,43	-182,96	5,62	1890,83	81,51

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}; \quad (10)$$

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}. \quad (11)$$

Для загрузений, рассчитанных по предложенной методике, величина неуровновешенных сил и моментов сопоставима с загрузениями по отдельным формам колебаний (если для форм колебаний величина неуровновешенных сил и моментов нулевая, в полученных комбинациях она также будет нулевой).

В то же время для результирующих усилий, вычисленных согласно СП 14.13330.2018, а также по алгоритму ЛИРА-САПР 2017, величина несбалансированных сил и моментов на два порядка больше, а абсолютная величина вектора несбалансированных сил больше максимального из расчетных продольных усилий.

На рис. 2 представлены результаты расчета узла на усилия, соответствующие форме колебаний № 4, усилия, вычисленные по алгоритму программы ЛИРА-САПР 2017, а также результаты для загрузения № 1, вычисленного по предложенной методике. Деформации элементов узла многократно преувеличены для наглядности, цветом обозначены эквивалентные напряжения в пластинчатых конечных элементах, вычисленные по теории Губера — Мизеса — Генки², отображена сетка разбивки на конечные элементы, для каждого расчета представлена сводка результатов.

Расчет на усилия, вычисленные по алгоритму программы ЛИРА-САПР 2017, остановился приблизительно на 70 % нагрузки, так как в опорном сечении элемента № 1 (арки) была достигнута предельная пластическая деформация. Причиной возникновения пластической деформации в этом сечении является несбалансированная нагрузка, которую, кроме всего прочего, необходимо воспринимать опорному сечению.

В то же время расчет для загрузения № 1, вычисленного по предложенной методике, был выполнен успешно; в опорном сечении арки напряжения весьма далеки от предела текучести. Основные всплески напряжений возникают в зоне передачи нагрузки с распорок на арку.

² IDEA StatiCa Connection Theoretical background. URL: https://www.ideastatica.com/resource/Content/02_Steel/Theoretical_background/Connection%20Theoretical%20Manual_EN_ver_8_1.pdf (дата обращения: 06.03.2020).

Можно заметить, что характеры распределения напряжений в загрузениях по форме № 4 и по предложенной методике схожи, отличие проявляется в том, что, во-первых, в загрузении, сформированном по предложенной методике, усилия приведены к расчетным, следовательно, уровень напряжений выше, а во-вторых, деформированная схема в этом загрузении более сложная: распорки не только изгибаются, но и закручиваются. Это является следствием учета в одном загрузении различных форм колебаний.

Дополнительные практические рекомендации. Если в расчетном комплексе массы для динамического расчета собираются автоматически по коэффициентам к загрузениям, а участвующие в сборе масс загрузения содержат равномерно распределенные по длине стержней нагрузки, то масса, приходящаяся на узлы соединения элементов, может быть достаточно большой. В динамическом расчете узловая масса дает узловые инерционные силы, поэтому при использовании изложенной выше методики в узлах

Таблица 3

Неуровновешенные силы и моменты

Загру- жение	X, кН	Y, кН	Z, кН	M_x , кН·м	M_y , кН·м	M_z , кН·м	F, кН	M, кН·м	
Формы	1	-17,5	0,0	38,9	-0,1	-0,8	0,0	42,7	0,8
	2	-1,8	-11,8	4,6	0,0	-0,2	0,0	12,8	0,2
	3	-26,3	9,1	-52,9	0,0	0,8	-0,1	59,8	0,8
	4	17,8	0,1	-25,8	0,1	0,5	0,2	31,3	0,5
	5	12,2	2,7	25,0	0,0	-0,2	-0,1	27,9	0,2
ЛИРА	-1518,8	-77,3	-551,0	-41,2	-41,6	11,6	1617,5	59,7	
СП	750,4	2602,7	89,1	57,6	-87,5	-12,8	2710,2	105,5	
Новый алгоритм	1	-31,0	-0,1	25,1	-0,1	-0,6	-0,2	39,9	0,6
	2	7,5	-13,9	27,0	0,0	-0,6	0,2	31,3	0,6
	3	0,7	-9,3	74,2	-0,2	-1,3	-0,1	74,8	1,3
	4	-27,3	13,5	18,5	-0,1	-0,3	-0,2	35,6	0,4
	5	21,8	2,9	46,2	0,0	-0,5	0,1	51,2	0,5
	6	9,4	0,1	21,0	0,0	-0,3	0,2	23,0	0,4
	7	3,0	3,1	84,1	-0,1	-1,3	-0,1	84,2	1,3
	8	-3,0	-3,1	-84,1	0,1	1,3	0,1	84,2	1,3
	9	-9,7	-0,1	-21,8	0,0	0,4	-0,2	23,9	0,4
	10	-23,8	-3,2	-50,7	0,0	0,6	-0,2	56,1	0,6
	11	26,9	-13,2	-18,2	0,1	0,3	0,2	35,1	0,4
	12	-0,7	9,3	-74,7	0,2	1,3	0,1	75,3	1,3
	13	-7,2	13,3	-25,7	0,0	0,6	-0,2	29,8	0,6
	14	-22,9	11,1	-58,8	0,1	0,9	-0,2	64,1	0,9
	15	30,5	0,1	-24,6	0,1	0,6	0,2	39,2	0,6

Рис. 2. Расчетная схема в IDEA StatiCa: а — общий вид конструкции (1 — арка 1; 2 — связь 1; 3 — связь 2; 4 — распорка 1; 5 — распорка 2; 6 — опорный столик; 7 — арка 2); б — результаты расчета по форме № 4; в — результаты расчета по алгоритму ЛИРА-САПР 2017; г — результаты расчета по предложенной методике

может не выполняться условие равновесия сил и моментов. Для уменьшения этого эффекта в расчетном комплексе необходимо перераспределить массы таким образом, чтобы только малая их часть приходилась на рассчитываемые узлы. Это можно сделать, например, разделяя стержни на несколько конечных элементов, причем конечные элементы в начале и в конце стержня целесообразно делать малой длины. Второй способ уменьшения влияния этого эффекта на результаты расчета заключается в правильном выборе опорного элемента: целесообразно выбирать в качестве опорного элемента тот, сечение которого наиболее развито, тогда напряжения в этом элементе от возникающего дисбаланса будут достаточно малы, чтобы их не учитывать.

Апробация методики. Приведенная выше методика была апробирована при расчете на сейсмическое воздействие узлов металлических конструкций покрытия корпуса «Спорт» образовательного центра «Сириус» в г. Сочи. Покрытие представляет собой ребристо-кольцевую оболочку, состоящую из стальных полуарок (ребер) сложного сечения, распорок (колец) сложного сечения и связей из круглых труб. Венчает оболочку световой фонарь, состоящий из кольца и системы перекрестных балок коробчатого сечения [12].

Расчет общей схемы металлических конструкций покрытия был выполнен в расчетном комплексе ЛИРА-САПР 2017 совместно с железобетонными конструкциями подземной части зда-

ния. Узлы соединения металлической конструкции были рассчитаны в IDEA StatiCa Connection, исходные данные для которой формировались автоматически с помощью программы, написанной на языке Visual Basic for Applications в среде Microsoft Excel.

Дальнейшее развитие. Дальнейшее развитие методики может заключаться в полной автоматизации процесса формирования расчетной схемы узла за счет интеграции алгоритма в программу IDEA StatiCa Connection или использования API, недоступного на сегодняшний день. Также методика может быть усовершенствована за счет использования более сложных алгоритмов сложения усилий по разным формам.

Выводы. Разработанная методика позволяет достичь равновесия приложенных к узлу металлической конструкции нагрузок, вычисленных по результатам расчета на сейсмическое воздействие линейно-спектральным методом и соответствующих результирующим усилиям от сейсмического воздействия, определяемым согласно действующим нормам.

Библиографический список

1. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. 4-е изд., перераб. и доп. М.: СКАД СОФТ, 2011. 736 с.
2. Масленников А. М., Нгуен Куок Донг. О достоверности спектрального метода при расчете на сейсмическое воздействие // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 2 (23). С. 51–53.
3. Егармин К. А., Сысоев Г. Ю., Ватин Н. И., Врублевская М. В. Анализ работы рамных узлов одноэтажного стального каркаса в условиях высокой сейсмичности с использованием ПК «SCAD» // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 2 (29). С. 34–44.
4. Мкртычев О. В., Дорожинский В. Б., Сидоров Д. С. Исследование сейсмостойкости железобетонных зданий различных конструктивных схем // Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 66–75.
5. Мкртычев О. В., Бунов А. А., Дорожинский В. Б. Сравнение линейно-спектрального и нелинейного динамического методов расчета на примере здания рамно-связевой конструктивной схемы при землетрясении // Вестник МГСУ. 2016. № 1. С. 57–67.
6. Мкртычев О. В., Джинчвелашвили Г. А., Бусалова М. С. Моделирование взаимодействия сооружения

с основанием при расчете на землетрясение // Вестник МГСУ. 2013. № 12. С. 34–40.

7. Петинов С. В., Гучинский Р. В. О расчетах долговечности трубчатых конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 1 (36). С. 39–47.

8. Bagautdinov R. I., Komarov Yu. P., Mostovskiy N. N., Daurov Z. S. Numerical model of beam-to-column joint finite stiffness // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 2 (125). С. 179–187.

9. Дарков А. В., Шапошников Н. Н. Строительная механика. 8-е изд. М.: Высшая школа, 1986. 607 с.

10. Александров А. В., Потапов В. Д., Державин Б. П. Соппротивление материалов. 3-е изд. М.: Высшая школа, 2003. 560 с.

11. Уздин А. М., Сандович Т. А., Аль-Насер-Мохомад Самих Амин. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1993. 176 с.

12. Петухова Е. Долина знаний. «Студия 44» разработала проект образовательного центра в Сочи, соединив павильонный подход с космическими мотивами, ассоциирующимися с названием центра «Сириус» // Архи.ру. 2018. 21 декабря. URL: <https://archi.ru/russia/81735/dolina-znaniy> (дата обращения: 06.03.2020).

References

1. Perelmuter A. V., Slivker V. I. *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnosti ikh analiza* [Calculation models of structures and their analysis possibilities]. 4-th ed., revised. Moscow, SKAD SOFT Publ., 2011, 736 p.
2. Maslennikov A. M., Nguen K. G. *O dostovernosti spektral'nogo metoda pri raschete na seysmicheskoe vozdeystvie* [About the spectral method authenticity at computation of the seismic effect]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2010, no. 2, pp. 51–53.
3. Egarmin K. A., Sysoev G. Yu., Vatin N. I., Vrublevskaya M. V. *Analiz raboty ramnykh uzlov jednoetazhnogo stal'nogo karkasa v usloviyakh vysokoy seysmiki s ispol'zovaniem PK "SCAD"* [Analysis of the work of frame units of a single-storey steel frame in high seismic conditions using SCAD]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy – Construction of unique buildings and structures*, 2015, no. 2, pp. 34–44.
4. Mkrtychev O. V., Dorozhinskiy V. B., Sidorov D. S. *Issledovanie seysmostoykosti zhelezobetonnykh zdaniy razlichnykh konstruktivnykh skhem* [Investigation of seismic resistance of reinforced concrete buildings of various structural schemes]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2015, no. 12, pp. 66–75.
5. Mkrtychev O. V., Bunov A. A., Dorozhinskiy V. B. *Sravnienie lineyno-spektral'nogo i nelineynogo*

dinamicheskogo metodov rascheta na primere zdaniya ramno-svyazevoy konstruktivnoy skhemy pri zemletryasenii [Comparison of linear-spectral and nonlinear dynamic calculation methods on the example of the building of a frame-link structural scheme at earthquake]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2016, no. 1, pp. 57–67.

6. Mkrtychev O. V., Dzhinchvelashvili G. A., Busalova M. S. *Modelirovanie vzaimodeystviya sooruzheniya s osnovaniem pri raschete na zemletryasenie* [Modeling the interaction of the structure with its base when calculating an earthquake]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2013, no. 12, pp. 34–40.

7. Petinov S. V., Guchinskiy R. V. *O raschetakh dolgovechnosti trubchatykh konstruktsiy* [On the calculation of the tubular structures' durability]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Engineering and construction magazine*, 2013, no. 1, pp. 39–47.

8. Bagautdinov R. I., Komarov Yu. P., Mostovskiy N. N., Daurov Z. S. *Numerical model of beam-to-column joint finite stiffness*. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2019, vol. 14. No. 2 (125), pp. 179–187.

9. Darkov A. V., Shaposhnikov N. N. *Stroitel'naya mekhanika* [Construction mechanics]. 8-th ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986, 607 p.

10. Aleksandrov A. V., Potapov V. D., Derzhavin B. P. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. 3-rd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003, 560 p.

11. Uzdin A. M., Sandovich T. A., Al-Naser-Mokhomad Samikh Amin. *Osnovy teorii seysmostoykosti i seysmostoykogo stroitel'stva zdaniy i sooruzheniy* [Fundamentals of the theory of seismic stability and earthquake-resistant construction of buildings and structures]. St. Petersburg, VNIIG im. B. E. Vedeneeva Publ., 1993, 176 p.

12. Petukhova E. *Dolina znaniy. «Studiya 44» razrabotala projekt obrazovatel'nogo tsentra v Sochi, soediniv pavil'onniy podkhod s kosmicheskimi motivami, assotsiiiruyushchimisya s nazvaniem tsentra «Sirius»* [Valley of knowledge. «Studio 44» has developed a project for an educational center in Sochi, combining a pavilion approach with cosmic motifs associated with the name of the center «Sirius»]. *Arkhi.ru.*, 2018, December 21. Available at: <https://archi.ru/russia/81735/dolina-znanii> (accessed: 06.03.2020).