УДК 69.07

© Б. С. Соколов, д-р техн. наук, профессор,
член-корреспондент РААСН
(Научно-исследовательский институт строительной
физики РААСН)
© Е. О. Трошков, канд. техн. наук, доцент
(Поволжский государственный технологический
университет, Научно-исследовательский институт
строительной физики РААСН)
E-mail: troshkoveo@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-1-87-93

© B. S. Sokolov, Dr. Sci. Tech., Professor,
Correspondent Member of RAACS
(Research Institute of Building Physics of Russian
Academy of Architecture and Construction Sciences)
© E. O. Troshkov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Volga State University of Technology,
(Research Institute of Building Physics of Russian
Academy of Architecture and Construction Sciences)
E-mail: troshkoveo@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ОСЕВОЙ ДЕФОРМАТИВНОСТИ СТЫКОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ УИКСС

INFLUENCE OF AXIAL DEFORMABILITY OF JOINTS ON THE RESULTS OF STATIC CALCULATION OF THE UIKSS BEARING SYSTEM

Рассматривается вопрос статического расчета несущей системы УИКСС (универсальная индустриальная каркасная система строительства), представляющей собой сборный железобетонный каркас с безбалочными бескапитальными перекрытиями, с учетом осевой деформативности штепсельных стыков плит с колоннами. На примере анализируется принцип моделирования рассматриваемого каркаса в программном комплексе «ЛИРА-САПР» с учетом введения параметров жесткости стыка, определенных по авторской методике, разработанной на основе численных и экспериментальных исследований. Приводятся сопоставление и анализ полученных усилий и перемещений с учетом и без учета деформативности штепсельных стыков колонн с плитами перекрытия.

Ключевые слова: несущая система, железобетонный каркас, несущая способность стыков, деформативность штепсельных стыков, компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния.

The article is devoted to the problem of static calculation of the UIKSS system (universal industrial frame construction system), which is a precast reinforced concrete frame with girder-free non-accumulating floors, taking into account the axial deformability of plug joints between columns and slabs. The principle of modeling the frame in the LIRA-SAPR software package is considered and illustrated with an example, taking into account the joint stiffness parameters determined by the author's method developed on the basis of numerical and experimental studies. The comparison and analysis of the obtained forces and displacements with and without taking into account the deformability of plug joints of columns with floor slabs is presented.

Keywords: bearing system, reinforced concrete frame, bearing capacity of joints, deformability of plug joints, computer simulation of stress-strain state.

Экспериментальные и численные исследования штепсельных стыков плит с колоннами, применяемых в сборном железобетонном безбалочном каркасе УИКСС [1], позволили разработать методики расчета их прочности и деформативности. Теоретическим основам расчета прочности данных стыков посвящена статья [2], а подробное описание предлагаемых методик для определения деформативности приведено в публикации [3].

Известно, что учет податливости стыков при выполнении статического расчета несущей системы способен повлиять на конечные значения усилий, возникающих в несущих элементах, что отражается на их несущей способности и конструировании¹ [4–6]. В данной статье рассматривается принцип моделирования податливости и оценка влияния осевой деформативности стыков на статический расчет несущей системы УИКСС.

¹ Рекомендации по расчету каркасов многоэтажных зданий с учетом податливости сопряжений сборных железобетонных конструкций. М.: ОАО ЦНИИПромзданий, 2002. 39 с.

В качестве примера выполняется расчет каркаса здания, схема расположения несущих элементов перекрытия которого приведена на рис. 1. Типовой размер плиты составляет в данном случае 3×3 м. Рассматриваемое здание имеет каркасную конструктивную схему, поэтому ограждающие конструкции монтируются непосредственно на плиты перекрытия. Для расчета принимается трехэтажное здание с высотой этажа 3,6 м, совмещенной кровлей и подвалом высотой 2,5 м. Геометрические размеры колонн — 400×400 мм, толщина плит перекрытия — 160 мм. Свес консольной части крайних плит относительно грани колонн — 600 мм. В местах прохождения лестничных клеток в перекрытии первого и второго этажей предусмотрены отверстия.

Определение усилий в элементах каркаса с безбалочными бескапитальными перекрытиями возможно с использованием метода заменяющих рам, однако в настоящее время определение усилий от внешних нагрузок, возникающих в зданиях и сооружениях, производится с использованием специализированных программно-вычислительных комплексов [7]. Анализ научно-технической литературы, а также сравнение усилий, определенных с помощью известных подходов к методу заменяющих рам и полученных с применением программных комплексов SCAD и «ЛИРА» [8], показали, что при расчете несущей системы УИКСС целесообразным является применение метода конечных элементов. Таким образом, определение усилий в элементах описыва-

емого примера выполняется с применением программного комплекса «ЛИРА-САПР». Расчетная схема, общий вид которой представлен на рис. 2, создана в препроцессоре «САПФИР».

При преобразовании схемы из препроцессора «САПФИР» в аналитический вид в местах стыка колонн и плит перекрытия были установлены абсолютно жесткие тела (АЖТ), имитирующие сечение колонны в расчетной схеме, состоящей из стержней и пластин. В основании колонн установлены связи, запрещающие линейные и угловые перемещения по шести направлениям (X, Y, Z, U_x, U_y, U_z).

Для моделирования плит перекрытия использовались универсальные четырехугольные и треугольные конечные элементы оболочки (тип 44, 42). Колонны моделировались универсальными пространственными стержневыми элементами (тип 10).

На рассматриваемую расчетную схему прикладывались постоянные и временные нагрузки, сбор которых выполнялся в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*».

По результатам статического расчета несущей системы были определены усилия, возникающие в элементах, что позволило провести расчеты конструкций по первой и второй группам предельных состояний. На рис. 3 для примера представлены изополя изгибающих моментов M_x , возникающие в пластинчатых элементах каркаса.

Рис. 1. Схема расположения несущих элементов перекрытия

Рис. 2. Схема рассчитываемого здания в препроцессоре «САПФИР»

Рис. 3. Изополю изгибающих моментов M_x

Для выполнения расчетов прочности и деформативности штепсельных стыков по разработанным методикам [2, 3] также проанализированы усилия в стыках колонн с плитами. Определено, что наихудшие комбинации усилий возникают в соединениях, расположенных на пересечении осей «2»/«Б», «2»/«А» и «1»/«Г».

Необходимым условием для расчетов штепсельных стыков является предварительное конструирование элементов, выполняемое по результатам определения несущей способности и де-

формативности конструкций по действующим нормам. Подробное описание конструирования элементов системы УИКСС приведено в [9]. Результаты расчетов прочности штепсельных стыков колонн с плитами перекрытия сводятся в таблицу, в которой отражаются возникающие усилия, предельные значения нагрузок, полученные в результате расчетов, коэффициенты использования несущей способности, а также стадии НДС, в которых находятся стыки (табл. 1).

На основе полученных данных, включая стадии напряженно-деформированного состояния

Таблица 1

Результаты расчета стыков по прочности на сжатие

Параметр	Подвал (верх)	1-й этаж (низ)	1-й этаж (верх)	2-й этаж (низ)	2-й этаж (верх)	3-й этаж (низ)	3-й этаж (верх)
Стык на пересечении осей «2»/«Б»							
N , кН	1915,1	1475,5	1442,0	984,9	969,3	516,6	501,1
N_{ult} , кН	2997,7	3138,4	2841,7	3045,8	2841,7	3045,8	779,5
Коэф. исп.	0,64	0,47	0,51	0,32	0,34	0,17	0,64
Стадия НДС	I стадия	I стадия	I стадия	I стадия	I стадия	I стадия	I стадия
Стык на пересечении осей «2»/«А»							
N , кН	1502,1	1127,3	1111,8	737,2	721,7	346,3	330,8
M_y , кН·м	50,5	-50,5	53,7	-46,2	36,6	-71,4	115,6
N_{ult} , кН	1629,1	1438	1293,5	1039,29	949,5	552,0	339,7
Коэф. исп.	0,92	0,78	0,86	0,71	0,76	0,63	0,97
Стадия НДС	II стадия	II стадия	II стадия	II стадия	II стадия	I стадия	II стадия
Стык на пересечении осей «1»/«Г»							
N , кН	1200,7	895,5	880	574,4	558,8	291,5	235,9
M_y , кН·м	-40,1	44,3	-44,7	40,6	-34,4	54,7	-83,7
M_z , кН·м	-52,2	53,4	-55,1	50,9	-44,5	65,8	-96,4
N_{ult} , кН	1209	1066	883,5	690,6	640,2	589,7	532,3
Коэф. исп.	0,99	0,84	0,99	0,83	0,87	0,49	0,44
Стадия НДС	II стадия	II стадия	II стадия	II стадия	II стадия	I стадия	I стадия

(НДС) стыков, выполняется расчет их осевой деформативности по методике, основанной на использовании линейных диаграмм зависимости «усилие — перемещение».

Для выполнения расчета конструкция стыка условно делится на две части (рис. 4). Верхнюю часть составляют торцевой участок колонны высотой $h_{k,v}$, на который действует усилие N_v , и растворный шов толщиной t , а нижняя состоит из плиты перекрытия толщиной h_n , растворного шва также толщиной t и оголовка колонны высотой $h_{k,n}$, воспринимающего усилие N_n .

Диаграммы деформирования частей стыка представлены в трехлинейном виде (рис. 5). Стадия I — упругая стадия работы ($N \leq (N_1 = 0,7N_{ult})$), стадия II — стадия трещинообразования ($N_1 < N \leq (N_2 = N_{ult})$), стадия III — стадия разрушения ($N = (N_3 = N_{ult})$).

Аналитическое описание диаграммы принимается аналогично действующему своду правил по выражению (1), а значения координат параметрических точек определяются по разработанным методикам, представленным в статье [3].

$$N = \begin{cases} \frac{N_1}{\Delta_1} \Delta, & 0 < \Delta_1 \\ \left[\left(1 - \frac{N_1}{N_{ult}} \right) \frac{\Delta - \Delta_1}{\Delta_2 - \Delta_1} + \frac{N_1}{N_{ult}} \right] N_{ult}, & \Delta_1 < \Delta \leq \Delta_2, (1) \\ N_{ult}, & \Delta_2 < \Delta \leq \Delta_3 \end{cases}$$

где N — значение продольного усилия в колоннах; Δ — значение продольных деформаций стыка при действии усилия N .

После построения диаграмм вычисляются необходимые при выполнении статического расчета каркаса значения осевой податливости (2) и коэффициенты жесткости стыков (3) для стадий I–III по направлениям действия силы:

$$\frac{1}{C_{z,i}} = \frac{\Delta_i}{N_i}; \quad (2)$$

$$C_{z,i} = \frac{N_i}{\Delta_i}. \quad (3)$$

Результаты определения осевой жесткости стыков рассматриваемого примера, расположенных на пересечении осей «2»/«Б», «2»/«А» и «1»/«Г», приведены в табл. 2.

Полученные результаты позволяют ввести в пространственную расчетную схему каркаса здания, созданную в программном комплексе

Рис. 4. Схема к определению осевой деформативности стыка

Рис. 5. Диаграмма деформирования при сжатии

«ЛИРА-САПР», параметры жесткости нижней и верхней частей стыков, выполнить расчет, а также оценить усилия и деформации несущей системы, возникающие с учетом осевой деформативности штепсельных стыков плит перекрытия с колоннами. Учет деформативности стыков моделируется введением в расчетную схему шарниров с заданной жесткостью (см. табл. 2), располагающихся в верхнем и нижнем сечениях колонн. Общий вид колонн расчетной схемы с учетом введенных шарниров представлен на рис. 6.

Выполненный статический расчет с учетом деформативности стыков показал, что усилия, возникающие в колоннах каркаса, изменились, что отображено в табл. 3 на примере колонн,

Таблица 2

Результаты определения осевой жесткости стыков

Расположение стыка на пересечении осей	Значение жесткости C_z , Н/мм (т/мм)			
	Подвал (верх)	1-й этаж (низ)	1, 2, 3-й этаж (верх)	2-й этаж (низ)
«2»/«Б»	4 092 134 (417,1)	5 943 177 (605,8)	4 009 904 (408,8)	5 821 373 (593,4)
«2»/«А»	2 036 841 (207,6)	2 982 630 (304,0)	1 998 142 (203,7)	2 926 252 (298,3)
«1»/«Г»	2 059 274 (209,9)	3 015 229 (307,4)	2 016 447 (205,6)	5 879 167 (599,3)

Таблица 3

Результаты определения усилий в колонне в осях «2»/«Б» до и после учета осевой деформативности стыков

Возникающие усилия		Подвал (низ)	Подвал (верх)	1-й этаж (низ)	1-й этаж (верх)	2-й этаж (низ)	2-й этаж (верх)	3-й этаж (низ)	3-й этаж (верх)
N , кН	До	-1925,5	-1915,1	-1457,5	-1442,0	-984,9	-969,3	-516,6	-501,1
	После	-1936,3	-1925,8	-1467	-1451,5	-991,7	-976,2	-518,8	-504,3
	Разница, %	0,56	0,56	0,65	0,65	0,69	0,71	0,42	0,63
M_y , кН · м	До	5,3	-4,5	7,4	-6,8	5,5	-3,4	7,7	-15,3
	После	5,5	-4,9	8,1	-7,8	6,8	-4,8	9,6	-17,8
	Разница, %	3,64	8,16	8,64	12,82	19,12	29,17	19,79	14,04
M_z , кН · м	До	-3,3	4,1	-5,2	5,3	-3,3	1,2	-6,9	13
	После	-3,6	4,5	-6,1	6,3	-4,8	2,8	-9	15,6
	Разница, %	8,33	8,89	14,75	15,87	31,25	57,14	23,33	16,67
Q_y , кН	До	-3	-3	-2,9	-2,9	-1,2	-1,2	-5,5	-5,5
	После	-3,3	-3,3	-3,4	-3,4	-2,1	-2,1	-6,8	-6,8
	Разница, %	9,09	9,09	14,71	14,71	42,86	42,86	19,12	19,12
Q_z , кН	До	-4	-4	-3,9	-3,9	-2,5	-2,5	-6,4	-6,4
	После	-4,3	-4,3	-4,4	-4,4	-3,2	-3,2	-7,6	-7,6
	Разница, %	6,98	6,98	11,36	11,36	21,88	21,88	15,79	15,79

расположенных на пересечении осей «2»/«Б». Из анализа таблицы видно, что наибольшее влияние учет осевой деформативности при расчете пространственной схемы здания оказал на значения изгибающих моментов и поперечных сил. Максимальная разница в данных усилиях достигает 57 %. Изменения значений продольных усилий в колоннах незначительны и находятся в пределах 1 %.

Также анализу подлежат перемещения, возникающие в элементах каркаса до и после введения параметров деформативности. На рис. 7 и 8 в графическом виде приводятся результаты полученных вертикальных перемещений, которые показывают, что максимальные значения деформаций увеличились с 3,17 до 5,22 мм, то есть на 40 %. Значения перемещений по остальным

направлениям имели минимальные величины и изменились в пределах 10 %.

Рассмотренный пример статического расчета несущей системы УИКСС без учета и с учетом влияния фактора осевой деформативности штепсельных стыков плит с колоннами показал, что учет жесткости стыков необходим при проектировании зданий с подобными конструктивными решениями. Учет деформативности стыков может сыграть ключевую роль при определении несущей способности элементов каркаса, так как данный параметр оказывает существенное влияние на перераспределение усилий. Оценка перемещений системы в соответствии с действующими нормами также должна выполняться с учетом деформативности стыков, так как за счет данной особенности наблюдается значительное увеличение вертикальных перемещений каркаса.

Рис. 6. Общий вид колонн расчетной схемы каркаса с учетом деформативности стыков

Рис. 7. Вертикальные перемещения без учета деформативности стыков

Рис. 8. Вертикальные перемещения с учетом деформативности стыков

Библиографический список

1. Пат. 141473 Российская Федерация, МПК E04B1/20 U1. Универсальная индустриальная каркасная система строительства - Татарстан (УИКСС-Татарстан) / Б. С. Соколов. № 2013128714/03; заявл. 24.06.2013; опубл. 10.06.2014.

2. Соколов Б. С. Теоретические основы методики расчета штепсельных стыков железобетонных конструкций зданий и сооружений // Жилищное строительство. 2016. № 3. С. 60–63.

3. Соколов Б. С., Трошков Е. О. Деформативность штепсельных стыков сборных железобетонных плит перекрытий с колоннами в несущей системе

УИКСС // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 3 (62). С. 32–39.

4. Кодыш Э. Н., Трекин Н. Н. Совершенствование нормативной базы проектирования железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 6. С. 25–28.

5. Трекин Н. Н., Быбка А. В., Ямалов А. В. Оценка влияния податливости сборных дисков перекрытий на работу каркаса многоэтажного здания // Научное обозрение. 2017. № 13. С. 23–26.

6. Трауш В. И., Колчунов В. И., Ключева Н. В. Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 4–11.

7. Ляхович Л. С., Перельмутер А. В. Некоторые вопросы оптимального проектирования строительных конструкций // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2014. Vol. 10, № 2. Pp. 14–23.

8. Соколов Б. С., Трошков Е. О. Сравнение результатов статического расчета железобетонной каркасной несущей системы здания с безбалочными бескапитальными перекрытиями, полученных по разным методикам // Известия КГАСУ. 2014. № 3 (29). С. 82–87.

9. Соколов Б. С., Трошков Е. О. Проектирование несущей системы УИКСС для строительства школьных и дошкольных учреждений // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы IV Междунар. (X Всерос.) конф. НАСКР-2018. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2018. С. 184–192.

References

1. Sokolov B. S. *Universal'naya industrial'naya karkasnaya sistema stroitel'stva - Tatarstan (UIKSS-Tatarstan)* [Universal industrial frame system of construction of Tatarstan (UIKSS-Tatarstan)]. Patent RF, no. 2013128714/03, 2014.

2. Sokolov B. S. *Teoreticheskie osnovy metodiki rascheta shtepsel'nykh stykov zhelezobetonnykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy* [Theoretical bases of the method of calculating plug joints of reinforced concrete structures of buildings and structures]. *Zhishchnoe stroitel'stvo – Housing construction*, 2016, no. 3, pp. 60–63.

3. Sokolov B. S., Troshkov E. O. *Deformativnost' shtepsel'nykh stykov sbornykh zhelezobetonnykh plit perekrytiy s kolonnami v nesushchey sisteme UIKSS*

[Deformability of plug-in joints of prefabricated reinforced concrete slabs and columns in the UIKSS structural floor system]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 3 (62), pp. 32–39.

4. Kodysh E. N., Trekin N. N. *Sovershenstvovanie normativnoy bazy proektirovaniya zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Improving the regulatory framework for designing reinforced concrete structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2016, no. 6, pp. 25–28.

5. Trekin N. N., Bybka A. V., Yamalov A. V. *Otsenka vliyaniya podatlivosti sbornykh diskov perekrytiy na rabotu karkasa mnogoetazhnogo zdaniya* [Assessment of the impact imposed by the pliability of prefabricated floor discs on the work of the frame of a multi-storey building]. *Nauchnoe obozrenie – Scientific review*, 2017, no. 13, pp. 23–26.

6. Travush V. I., Kolchunov V. I., Klyueva N. V. *Nekotorye napravleniya razvitiya teorii zhivuchesti konstruktivnykh sistem zdaniy i sooruzheniy* [Some directions of developing the survivability theory of building and structure structural systems]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2015, no. 3, pp. 4–11.

7. Lyakhovich L. S., Perel'muter A. V. *Nekotorye voprosy optimal'nogo proektirovaniya stroitel'nykh konstruktsiy* [Some issues of optimal design of building structures]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 14–23.

8. Sokolov B. S., Troshkov E. O. *Sravnienie rezul'tatov staticheskogo rascheta zhelezobetonnoy karkasnoy nesushchey sistemy zdaniya s bezbalochnymi beskapitel'nymi perekrytiyami, poluchennykh po raznym metodikam* [Comparison of static calculation results obtained by different methods of the reinforced concrete frame bearing system of the building with girder-free non-accumulating ceilings]. *Izvestiya KGASU – Bulletin of KSUAE*, 2014, no. 3 (29), pp. 82–87.

9. Sokolov B. S., Troshkov E. O. *Proektirovanie nesushchey sistemy UIKSS dlya stroitel'stva shkol'nykh i doshkol'nykh uchrezhdeniy* [Designing a load-bearing system of UIKSS for construction of school and pre-school institutions]. *Trudy IV Mezhdunar. (X Vseros.) konf. NASKR-2018 «Novoe v arkhitekture, proektirovanii stroitel'nykh konstruktsiy i rekonstruktsii»* [Proc. of the IV Int. conf. (X All-Russian conf.) NASCR-2018 “Innovations in architecture, design of building structures and reconstruction”]. *Cheboksary, Chuvash. Un-t Publ.*, 2018, pp. 184–192.