

## Экспериментальные исследования влияния деформаций в узловых соединениях на напряженно-деформированное состояние в натурной опоре из МИК-С

Владимир Николаевич Должиков, Елена Николаевна Должикова  
Сочинский государственный университет (СГУ); г. Сочи, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Деформации в болтовых соединениях элементов при теоретических исследованиях учитывались путем введения модулей линейных деформаций элементов взамен модулей упругости. Необходимость учета деформативности сопряжений связана с тем, что жесткие узлы стержневых конструкций в действительности деформативны, а шарнирные способны воспринимать моменты. Податливость болтовых соединений приводит к увеличению общих деформаций структурных конструкций на 40 % и изменению усилий в элементах до 30 %. В некоторых случаях усилия в элементах меняют знак.

**Материалы и методы.** Эксперимент проводился при содействии Мостоотряда № 81 на натурной конструкции вспомогательной опоры для полунавесной сборки пролетного строения моста, согласованной с ЦНИИС и Главмостостроем. Вертикальная нагрузка на опору создавалась весом монтируемого пролетного строения моста, горизонтальная — с помощью троса, прикрепленного к трактору-бульдозеру С-100. Контроль натяжения троса бульдозером выполняли динамометром. Измерения относительных деформаций осуществляли по маякам, засверленным в тело элементов, с помощью деформометра с базой 505 мм и ценой деления 0,01 мм. Смещения в болтовых соединениях элементов измеряли деформометром с базой 125 мм.

**Результаты.** Экспериментальные значения усилий, полученные при наличии смещений в соединениях вспомогательной опоры, достаточно близки к результатам расчета по предложенному методу. Средние значения отношений экспериментальных усилий в элементах с учетом смещений в соединениях к значениям теоретических усилий без смещений (по шарнирной схеме) и к значениям теоретических усилий с учетом смещений в болтовых соединениях по предложенной методике соответственно равны 0,84 и 1,05. Среднее относительное изменение усилий, вызванное смещениями в соединениях элементов, составляет 48 % для раскосов и 18 % для стоек.

**Выводы.** Показано, что экспериментальные значения усилий в элементах близки к их расчетным значениям, определенным по расчетным модулям линейной деформации. При этом величины усилий существенно отличаются от их значений, полученных расчетом без учета смещений в элементах.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** модуль линейной деформации, напряженно-деформированное состояние, экспериментальные исследования, усилия, смещения в соединениях

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Должиков В.Н., Должикова Е.Н. Экспериментальные исследования влияния деформаций в узловых соединениях на напряженно-деформированное состояние в натурной опоре из МИК-С // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 9. С. 1484–1493. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1484-1493

Автор, ответственный за переписку: Владимир Николаевич Должиков, doljikov\_v@mail.ru.

## Experimental studies of the influence of deformations in nodal joints on the stress-strain state in a full-scale support made of MIC-C

Vladimir N. Dolzhikov, Elena N. Dolzhikova  
Sochi State University (SSU); Sochi, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Deformations in bolted joints of elements in theoretical studies were taken into account by introducing linear deformation modules of elements instead of elasticity modules. The necessity to take into account the deformability of the interfaces is due to the fact that rigid nodes of rod structures are actually deformable, while hinged ones are able to perceive moments. The pliability of bolted joints leads to increase in the total deformations of structural structures by 40 % and change in the forces in the elements by up to 30 %. In some cases, the forces in the elements change the sign.

**Materials and methods.** The experiment was carried out with the assistance of Bridge Crew No. 81 on a full-scale design of an auxiliary support for the semi-mounted assembly of the bridge span structure, coordinated with the Central Research Institute and Glavmoststroy. The vertical load on the support was created by the weight of the bridge superstructure being mounted, the horizontal load was created using a cable attached to a C-100 bulldozer tractor. Cable tension control with

a bulldozer was performed with a dynamometer. Relative deformations were measured using beacons drilled into the body of the elements using a strainmeter with a base of 505 mm and a division price of 0.01 mm. The displacements in the bolted joints of the elements were measured with a strainmeter with a base of 125 mm.

**Results.** The experimental force values obtained in the presence of displacements in the joints of the auxiliary support are quite close to the calculation results according to the proposed method. The average value of the ratio of experimental forces in the elements, taking into account displacements in the joints, to the values of theoretical forces without displacements (according to the hinge scheme) and to the values of theoretical forces, taking into account displacements in bolted joints, according to the proposed methodology, are 0.84 and 1.05, respectively. The average relative change in forces caused by displacements in the joints of the elements is 48 % for braces and 18 % for racks.

**Conclusions.** It is shown that the experimental values of the forces in the elements are close to their calculated values determined by the calculated modules of linear deformation. At the same time, the magnitude of the forces differs significantly from their values obtained by calculation without taking into account the displacements in the elements.

**KEYWORDS:** linear deformation modulus, stress-strain state, experimental studies, forces, displacements in joint

**FOR CITATION:** Dolzhikov V.N., Dolzhikova E.N. Experimental studies of the influence of deformations in nodal joints on the stress-strain state in a full-scale support made of MIC-C. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(9):1484-1493. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1484-1493 (rus.).

*Corresponding author:* Vladimir N. Dolzhikov, doljikov\_v@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящие экспериментальные исследования на натурной конструкции вспомогательной опоры для полунавесной сборки пролетного строения при строительстве железнодорожного моста через р. Дон из элементов МИК-С являются продолжением исследований авторов по влиянию деформативности узловых соединений на напряженно-деформированное состояние (НДС) металлических стержневых систем [1]. Деформации в болтовых соединениях элементов при теоретических исследованиях учитывались путем введения модулей линейных деформаций элементов взамен модулей упругости [1]. Расчет ведется итерационным методом с поэтапным уточнением усилий в элементах. В первом приближении значения модулей деформации элементов определяются по напряжениям в конструкции с не смещающимися узлами.

При исследовании НДС на натурной конструкции вспомогательной опоры для полунавесной сборки пролетного строения при строительстве железнодорожного моста через р. Дон у г. Георгиевск смещения в ее болтовых соединениях учитывались посредством использования коэффициентов изменения модулей упругости, определяемых как отношение модуля линейной деформации элемента к модулю упругости материала.

Необходимость учета деформативности сопряжений связана с тем, что жесткие узлы стержневых конструкций в действительности деформативны, а шарнирные способны воспринимать значительные моменты. Этот факт подтверждается в работе [2].

Экспериментально-теоретические исследования, проводившиеся в Центральном научно-исследовательском институте строительных конструкций имени В.А. Кучеренко на опорах ЛЭП с болтовыми соединениями [3], показали, что податливость в болтовых соединениях приводит к остаточным прогибам в системе, увеличению ее деформативности и резкому перераспределению внутренних усилий.

Выполнены исследования по определению параметров деформирования узловых соединений, установлено, что податливость узловых элементов способствует появлению дополнительных прогибов в структурной плите и перераспределению внутренних усилий в системе [4]. Результаты испытаний позволили установить, что экспериментальные вертикальные перемещения узлов структуры превышают их численные значения [5].

Определены действительные жесткостные характеристики узловых элементов системы для случая одноосного растяжения, которые использовались при составлении расчетных схем [6]. Податливость узловых элементов учитывалась [6] введением по концам стержневых элементов вставок с полученными жесткостными характеристиками, что дало возможность приблизить расчетные значения вертикальных перемещений к экспериментальным значениям. Вопрос действительной работы каркаса здания в целом с учетом особенностей работы узлов, соединяющих несущие элементы, представляет интерес для решения инженерных задач [7]. В работе [7] также исследуется влияние начальных зазоров во фланцевых соединениях типа «балка – колонна» на прочностные и деформативные характеристики узлового решения.

Методике учета деформативности узловых соединений уделяется большое внимание и в европейских странах. Так, в публикациях [8–10] представлены результаты исследований узловых соединений с учетом их жесткостных параметров.

Податливость болтовых соединений приводит к увеличению общих деформаций структурной конструкции на 40 % и изменению усилий в элементах до 30 %. В некоторых случаях усилия в элементах меняют знак, т.е. растянутый элемент начинает работать на сжатие и теряет устойчивость. Проблеме устойчивости элементов стержневых конструкций посвящено большое количество работ как отечественных, так и зарубежных ученых [11]. Одна

из отличительных особенностей таких систем — нелинейная работа узловых соединений [12].

Осуществлен краткий обзор отечественных и зарубежных исследований, посвященных методам определения податливости узлов стальных конструкций, методикам расчета конструкций с учетом податливости узлов, способам моделирования узлов с учетом податливости [13]. Результаты численных и экспериментальных исследований стальных ферм из гнутых тонкостенных профилей и алгоритм методики расчета конструкций с учетом податливости узловых соединений представлены в труде [14]. Приведена оценка влияния податливости опорного узла колонны на распределение усилий в элементах стального рамно-связевого каркаса [15]. Изучено влияние податливости узлов баз колонн на НДС каркаса [16].

Результаты исследований работы узлов сопряжения колонн и несущих ригелей системы «Купасс» на распределение НДС представлены в публикации [17]. Установлено, что основным фактором, определяющим деформируемость соединения, служит деформация углов, на долю которой приходится до 87 % общей деформации соединения [18]. Проведены исследования конечной жесткости узловых соединений металлических конструкций [19]. Показаны результаты экспериментальных и теоретических исследований работы соединений для различных видов нагружения [20]. В работе [21] отмечается, что узловые соединения являются ключевыми элементами в конструкциях. В них сконцентрирована основная часть напряжений.

Выявлено, что податливость узловых соединений купола оказывает влияние на его НДС, в том числе на усилия в стержнях и прогибы узлов [22].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель настоящего экспериментального исследования — изучение влияния деформативности в узловых соединениях стержневых конструкций на НДС системы. Экспериментальные исследования проводились на натурной опоре из элементов МИК-С для продольной надвижки пролетных строений моста.

Задачи эксперимента: оценка влияния деформативности в узловых соединениях элементов временной вспомогательной опоры при загрузении ее весом пролетного строения и искусственно созданной горизонтальной нагрузкой.

Для решения указанной задачи разработана программа экспериментального исследования, согласованная с Всесоюзным научно-исследовательским институтом транспортного строительства (ЦНИИС) и Главмостостроем:

- испытание временной опоры на сжатие путем загрузки ее пролетным строением моста во время продольной надвижки;

- создание искусственной горизонтальной нагрузки с помощью троса, прикрепленного через динамометр к трактору-бульдозеру С-100;

- статистическая обработка полученных в ходе натурального эксперимента данных и оценка достоверности;

- сравнение полученных экспериментальных данных с результатами численного моделирования.

Эксперимент проводился при содействии Мостоотряда № 81 на вспомогательной опоре В-У1 для сборки пролетного строения при строительстве железнодорожного моста левого пути через р. Дон на 670 км у г. Георгиу-Деж по методике, согласованной с ЦНИИС и Главмостостроем.

Сборка вспомогательной опоры осуществлялась в соответствии с «Руководством и нормативами по технологии постановки высокопрочных болтов в монтажных соединениях металлоконструкций»<sup>1</sup>, разработанных к главе СНиП III-18-75 «Металлические конструкции. Правила производства и приемки работ».

Для соединений элементов вспомогательной опоры применялись высокопрочные болты, гайки и шайбы, изготовленные в соответствии с требованиями ГОСТ 22353-77, ГОСТ 22356-77.

Согласно ГОСТ 22356-77 высокопрочные болты имеют клеймо завода-изготовителя, а также маркировку, показывающую временное сопротивление в кгс/мм<sup>2</sup>, и условное обозначение номера плавки.

Механические свойства и материалы болтов, гаек и шайб отвечают требованиям табл. 1-3<sup>1</sup>.

С целью определения влияния деформативности в одноболтовых соединениях на НДС элементов временной опоры выполнены экспериментальные исследования работы стержневой конструкции. Для этого была разработана методика выполнения эксперимента, собрана временная опора из МИК-С, установлены маяки на стойках и раскосах и сняты нулевые показания на незагруженной временной опоре.

В состав натурной экспериментальной конструкции входили две семярусные секции из элементов МИК-С, соединенные в уровне 6-й и 7-й секций раскосами и горизонтальными схватками. Каждая секция состоит из 4 стоек и 4 раскосов. Соединение стоек и раскосов, а также стоек секций, осуществлялось на высокопрочных болтах диаметром 24 мм. Номинальная разность диаметров болта и отверстия составляла 1 мм.

Вся временная опора опиралась на металлическую инвентарную конструкцию пакетного типа МИК-П. Нагрузка от пролетного строения на временную опору передается тоже через пакетную

<sup>1</sup> Руководство и нормативы по технологии постановки высокопрочных болтов в монтажных соединениях металлоконструкций // ЦНИИ Проектстальконструкция Госстроя СССР. М. : Стройиздат, 1982. 92 с.

конструкцию МИК-П, установленную поверх 7-го яруса опоры.

Общий вид вспомогательной опоры без нагружения показан на рис. 1.

Комплект МИК-С включает 12 марок: стойки, раскосы, распорки и цельносварные ростверки. Сечения элементов трубчатые с площадью  $24,2 \text{ см}^2$  для стоек и  $14,13 \text{ см}^2$  для раскосов и распорок. Наружный диаметр стоек — 203 мм. Толщина стенки стоек — 9 мм. Наружный диаметр раскосов и распорок — 95 мм. Толщина стенки раскосов и распорок — 5 мм. Соединения элементов решетки в узлах одноболтовые на высокопрочных болтах диаметром 24 мм.

Установка высокопрочных болтов в соединениях элементов опоры проводилась без контроля натяжения с помощью обычных ключей.

Вертикальная нагрузка на опору создавалась весом пролетного строения.

Горизонтальная нагрузка прикладывалась с помощью троса, прикрепленного к трактору-бульдозеру С-100. Контроль натяжения троса бульдозером выполняли динамометром. Определение параметров и характеристик динамометра производилось при следующих условиях:

- температура окружающего воздуха —  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- относительная влажность — 48 %;
- атмосферное давление — 720 мм рт. ст.

Динамометр был установлен в положении, при котором измеряемое усилие направлено вдоль присоединительных звеньев. Нагрузка прилагалась плавно, без рывков.

В момент снятия показаний приборов вертикальная нагрузка на одну (испытываемую) плоскость опоры от веса пролетного строения и монтажного агрегата составляла 800 кН, горизонтальная — 17,7 кН.

Общий вид вспомогательной опоры в момент испытания вертикальной и горизонтальной нагрузкой приведен на рис. 2.

Схема вспомогательной опоры с нумерацией узлов и расположением приложенных нагрузок показана на рис. 3.

Измерения относительных деформаций выполняли по маякам, засверленным в тело элементов, с помощью деформометра (рис. 4) с базой 505 мм и ценой деления 0,01 мм.

Смещения в болтовых соединениях элементов измеряли деформометром с базой 125 мм (рис. 5).

Принятая для проведения измерений система регистрации напряжений в элементах конструкций с помощью механических тензометров, разработанных в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, со съемным деформометром является наиболее надежной в полевых условиях по сравнению с использованием электромеханических или электронных систем измерений. При применении электромеханических или электронных систем измерений возможна реальная угроза повреждения или утрата закреплен-



Рис. 1. Общий вид вспомогательной опоры до нагружения  
Fig. 1. General view of the auxiliary support before loading

ных на конструкциях приборов или соединительных кабелей для электромеханических датчиков. Воздействие на электромеханические или электронные датчики атмосферных осадков и электромагнитного излучения от сварочных работ или другого строительного-монтажного оборудования также может привести к их повреждению [23].

Нулевые отсчеты замеряли после установки опоры в проектное положение без нагружения пролетным строением (рис. 1). Снятие нулевых отсчетов в нижних 2 секциях опоры до высоты 4 м не представлялось возможным ввиду сильного паводка. Усилие в раскосе 28–32 и усилие в распорке 27–28 приведены в таблице. Усилия в остальных распорках не приведены, так как они нулевые.



Рис. 2. Общий вид вспомогательной опоры под нагрузкой  
Fig. 2. General view of the auxiliary support under load

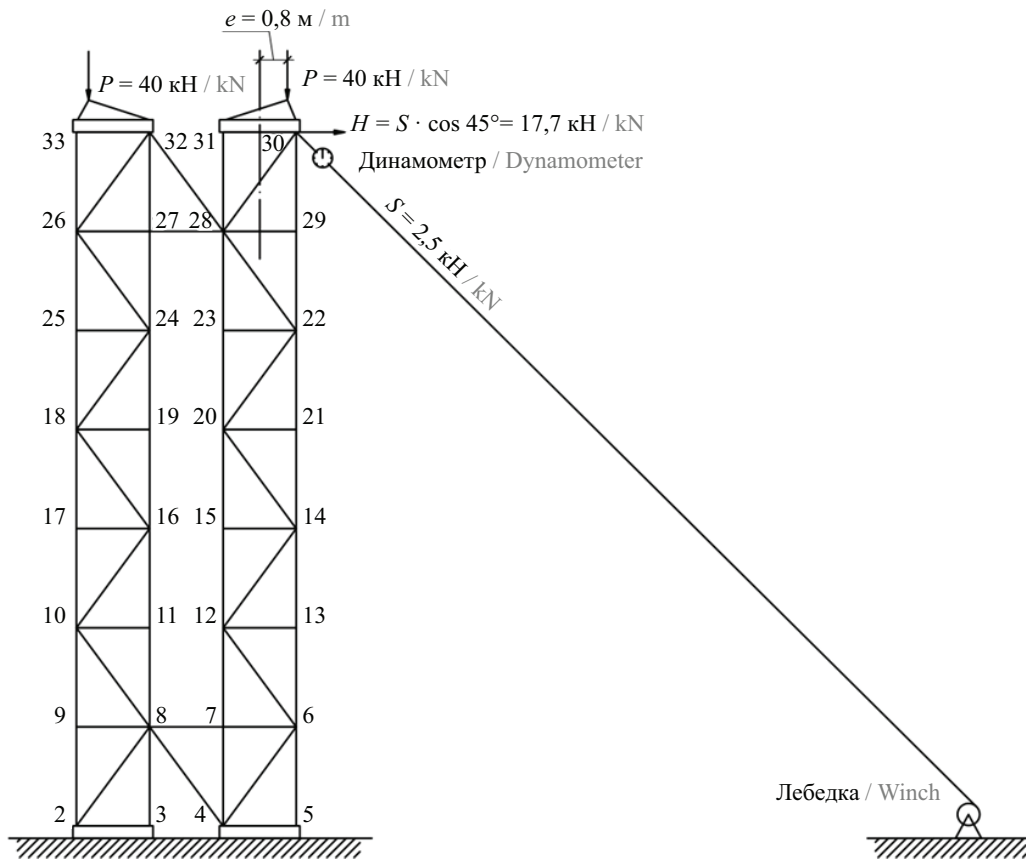


Рис. 3. Схема вспомогательной опоры с нумерацией узлов и расположением приложенных нагрузок

Fig. 3. The diagram of the auxiliary support with the numbering of nodes and the location of the applied loads



Рис. 4. Измерение относительных деформаций элементов опоры деформометром с базой 505 мм

Fig. 4. Measurement of relative deformations of support elements with a deformometer with a base of 505 mm

Экспериментальные усилия в элементах определяли по замеренным в ходе эксперимента относительным деформациям.

Для сравнения с экспериментом выполнены расчеты опоры без и с учетом смещений (по предложенному методу) в болтовых соединениях раскосов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При расчете опоры без учета смещений в узловых соединениях расчетная схема опоры представлялась как статически неопределимая конструкция с двумя неизвестными  $X_1, X_2$  соответственно неизвестным усилиям в соединительных элементах (27–28) и (28–32). Задача решалась методом сил. Число канонических уравнений (кинематической эквивалентности) всегда равно числу удаленных связей и имеет вид:

$$\delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1p} = 0;$$

$$\delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2p} = 0.$$

Единичные коэффициенты  $\delta_{ik}$  и свободные члены  $\Delta_{ip}$  представляют собой перемещение и определяются по формуле Мора.

Учет смещений в болтовых соединениях элементов опоры учитывался путем введения модулей линейных деформаций элементов взамен модулей упругости металла МИК-С. Модуль линейной деформации материала болтового соединения  $E_{ci}$  при усилии  $N_i$  в  $i$ -м элементе запишется как [1, 24]:

$$E_{ci} = N_i / \Delta_{ci} = (T_i + S_i(\Delta_{ci})) / u + v + \Delta_{cm},$$

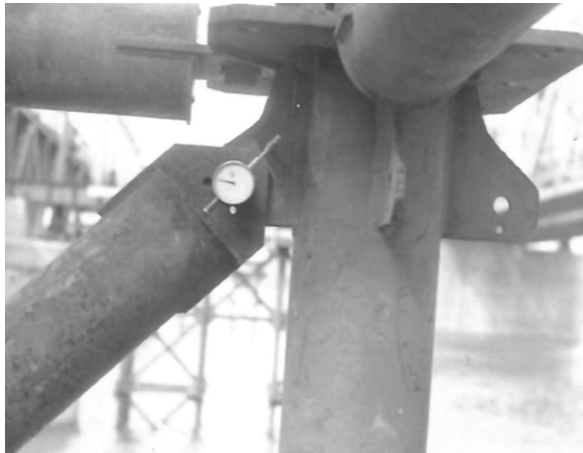


Рис. 5. Измерение смещений в болтовых соединениях элементов

Fig. 5. Changing the displacements in the bolted connections of the elements

где  $T_i$  — сила трения в соединении  $i$ -го элемента;  $S_i(\Delta_{ci})$  — эмпирическая зависимость при работе  $i$ -го соединения на смятие [25];  $u$  — сдвиг соединения на разность номинальных диаметров болта и отверстия;  $v$  — допускаемые отклонения от номинальных диаметров болта и отверстия;  $\Delta_{cm}$  — неупругая деформация смятия.

Для соединения на высокопрочных болтах сила трения  $T_i$  определяется по формуле [25]:

$$T_i = N_n f(b_0 + b_1 \Delta_i),$$

где  $N_n$  — нормативное усилие натяжения болта;  $f$  — коэффициент трения;  $b_0, b_1$  — эмпирические параметры.

Значения эмпирических параметров низколегированной и углеродистой стали приводятся в таблице [25].

Изменение расстояний  $\Delta l_i$  между центрами узлов  $i$ -го элемента определяется как сумма упругой

деформации  $\Delta l_{yi}$  и смещений в креплениях в начале  $\Delta_{1,i}$  и конце  $\Delta_{2,i}$   $i$ -го элемента. Тогда [1]:

$$\Delta l_i = \Delta l_{yi} + \Delta_{1,i} + \Delta_{2,i}$$

или

$$\Delta l_i = N_i (l_i / EF_i + 1/E_{c,1i} + 1/E_{c,2i}).$$

Отсюда находим модуль линейной деформации  $i$ -го элемента:

$$E_{\Delta,i} = l_i E E_{c,1i} E_{c,2i} / EF_i E_{c,1i} + EF_i E_{c,2i} + l_i E_{c,1i} i E_{c,2i}.$$

Расчет ведется методом итераций с поэтапным уточнением усилий в элементах. Итерационный процесс можно выполнять, также уточняя напряжения  $\sigma_i$  в  $i$ -м элементе. В этом случае формула для определения модуля линейной деформации элемента будет иметь вид:

$$E_{\Delta,i} = E / (2E \Delta l_i / \sigma_i + 1).$$

В первом приближении значения модулей  $E_{\Delta,i}$  определяются по напряжениям в конструкции с не смещающимися узлами.

По результатам измерений деформаций с помощью деформометров по закону Гука устанавливались напряжения в элементах временной опоры из МИК-С. Показание деформометра позволяло определить напряжение, возникающее в месте установки прибора.

Согласно закону Гука:

$$\sigma = E \epsilon,$$

где  $\sigma$  — напряжение в конструкции;  $E$  — модуль упругости материала;  $\epsilon = \Delta L / L$  — относительная деформация;  $\Delta L$  — абсолютная деформация;  $L = 50$  см — измерительная база прибора.

Дальше напряжения преобразовывались в усилия.

Начало отсчета индикатора переносилось в середину его шкалы, что позволяло измерять напряжения как в сжатых, так и в растянутых элементах.

Сравнение результатов расчета и эксперимента приведено в таблице.

Начало–конец элемента The beginning is the end of the element	Усилия в элементах, кН / Forces in the elements, kN		
	Теоретические / Theoretical		Экспериментальные при наличии смещений в соединениях $N_{cm}^{\Delta}$ Experimental in the presence of displacements in the joints $N_r^{ex}$
	Без учета смещений в соединениях $N_{ш}^{(r)}$ Excluding offsets in joints $N_j^{(r)}$	С учетом смещений в соединениях $N_{cm}^{(r)}$ Including offsets in joints $N_r^{(r)}$	
1	2	3	4
10–17	–220,6	–273,3	–271,6
11–16	–231,2	–162,0	–181,1
12–15	–99,8	–43,7	–50,3
13–14	–265,9	–338,5	–301,8
14–21	–325,6	–361,9	–331,9
15–20	–99,8	–43,7	–60,3
16–19	–136,1	–103,2	–110,6
17–18	–220,6	–273,3	–271,6
18–25	–315,7	–332,1	–342,0

Начало–конец элемента The beginning is the end of the element	Усилия в элементах, кН / Forces in the elements, kN		
	Теоретические / Theoretical		Экспериментальные при наличии смещений в соединениях $N_{cm}^3$ Experimental in the presence of displacements in the joints $N_r^{ex}$
	Без учета смещений в соединениях $N_{ш}^{(T)}$ Excluding offsets in joints $N_j^{(T)}$	С учетом смещений в соединениях $N_{cm}^{(T)}$ Including offsets in joints $N_r^{(T)}$	
1	2	3	4
19–24	–136,1	–103,2	–90,5
20–23	–40,1	–20,3	–30,1
21–22	–325,6	–361,9	–352,1
22–29	–385,3	–385,3	–372,2
23–28	–40,1	–20,3	–30,1
24–27	–41,1	–44,4	–50,3
25–26	–315,7	–332,1	–321,9
26–33	–367,6	–367,6	–362,1
27–32	–41,1	–44,4	–40,2
28–31	–32,4	–32,4	–30,1
29–30	–385,3	–385,3	–382,2
12–14	–42,2	–16,5	–16,5
10–16	67,2	41,5	47,0
16–18	–67,2	–41,5	–41,1
14–20	42,2	16,5	17,6
20–22	–42,2	–16,5	–17,6
18–24	67,2	41,5	47,0
24–26	–67,2	–41,5	–41,1
22–28	42,2	16,5	17,6
28–30	25,0	25,0	23,5
28–32	6,1	8,5	11,7
26–32	6,1	8,5	5,8
26–27	43,2	23,4	23,5
27–28	43,2	23,4	29,4

Средняя величина замеренных в ходе эксперимента смещений составила 0,4 мм и объясняется наличием небольших усилий в раскосах (см. таблицу).

Экспериментальные значения усилий, полученные при наличии смещений в соединениях вспомогательной опоры, достаточно близки к результатам расчета по предложенному методу.

Максимальное изменение усилий в результате смещений в болтовых соединениях составило:

- увеличение усилий в элементах 10–17, 13–14, 17–18, 18–25 соответственно равно 23; 13,5; 23; 8 %;
- уменьшение усилий в элементах 11–16, 12–15, 19–24, 12–14 соответственно равно 21,7; 49,6; 33,5; 69,9 %.

Средние значения отношений экспериментальных усилий в элементах с учетом смещений в соединениях к значениям теоретических усилий без смещений (по шарнирной схеме) и к значениям теоретических усилий с учетом смещений в болто-

вых соединениях по предложенной методике соответственно равны 0,84 и 1,05.

Среднее относительное изменение усилий, вызванное смещениями в соединениях элементов, составляет 48 % для раскосов и 18 % для стоек.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены экспериментальные исследования на натурной временной опоре из МИК-С для полунанесной сборки пролетных строений.

В результате экспериментальных исследований установлено, что значения усилий, возникающих в стержнях временной опоры после деформаций в соединениях, существенно отличаются от полученных расчетом без учета смещений.

Увеличение усилий в элементах 10–17, 13–14, 17–18, 18–25 соответственно равно 23; 13,5; 23; 8 %. Уменьшение усилий в элементах 11–16, 12–15,

19–24, 12–14 соответственно равно 21,7; 49,6; 33,5; 69,9 %. Среднее относительное изменение усилий, вызванное смещениями в соединениях элементов, составляет 48 % для раскосов и 18 % для стоек.

Максимальное увеличение усилий в элементах составляет 23 %, максимальное уменьшение усилий — 69,9 %.

Показано, что экспериментальные значения усилий в элементах близки к их расчетным значениям, определенным по расчетным модулям линейной деформации.

Средние значения отношений экспериментальных усилий в элементах к значениям теоретических

усилий без смещений и к значениям теоретических усилий с учетом смещений в болтовых соединениях (по предложенной методике) соответственно равны 0,84 и 1,05.

Наиболее чувствительными к деформациям в соединениях являются раскосы, при этом в более нагруженных относительное изменение усилий вследствие податливости узлов меньше, чем в менее нагруженных.

Результаты эксперимента показывают, что столь значительные изменения усилий и напряжений от деформативности в узловых соединениях стержневых конструкций необходимо учитывать при проектировании инженерных сооружений.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Должиков В.Н., Удотова О.А. Влияние податливости узловых соединений на напряженно-деформированное состояние металлических стержневых систем // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 11 (779). С. 15–25. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-779-11-15-25. EDN RVOXQH.
2. Васильков Б.С., Володин Н.М. Расчет сборных конструкций зданий с учетом податливости соединений. М.: Стройиздат, 1985. 144 с.
3. Трофимов В.И., Третьякова Э.В., Зуева И.И. Учет влияния податливости болтового соединения на работу структурной конструкции // Строительная механика и расчет сооружений. 1976. № 1. С. 24–26. EDN YREYHX.
4. Драган В.И., Шурип А.Б. Податливость стержневых систем с узловыми соединениями на пространственных листовых фасонках // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 7. С. 37–43. EDN UBYGRL.
5. Davoodi M.R., Pashaei M.H., Mostafavian S.A. Experimental study of the effects of bolt tightness on the behaviour of MERO-type double layer grids // Journal of the international Association for Shell and Spatial Structures. 2007. Vol. 48. Issue 153. Pp. 45–52.
6. Ghasemi M., Davoodi M.R., Mostafavia S.A. Tensile stiffness of MERO-type connector regarding bolt tightness // Journal of Applied Sciences. 2010. Vol. 10. Issue 9. Pp. 724–730. DOI: 10.3923/jas.2010.724.730
7. Туснин А.Р., Платонова В.Д. Экспериментальные исследования влияния зазоров во фланцевых соединениях на напряженно-деформированное состояние узла // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 11. С. 1763–1779. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1763-1779. EDN ХНХVKE.
8. Yoganata Y.S., Suswanto B., Iranata D., Irawan D. Analysis study of extended end plate connection due to cyclic load using finite element method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 930. Issue 1. P. 012050. DOI: 10.1088/1757-899X/930/1/012050
9. Luo L., Du M., Yuan J., Shi J., Yu S., Zhang Y. Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection // Materials. 2020. Vol. 13. Issue 22. P. 5133. DOI: 10.3390/ma13225133
10. Zhao D., Wang Z., Pan J., Wang P. Error analysis method of geometrically incomplete similarity of end-plate connection based on linear regression // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. Issue 14. P. 4812. DOI: 10.3390/app10144812
11. Kayumov R.A., Shakirzyanov F.R. Large Deflections and Stability of Low-Angle Arches and Panels During Creep Flow // Advanced Structured Materials. 2020. С. 237–248. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2\_18
12. Zheng Y., Guo Z. Investigation of joint behavior of disk-lock and cuplock steel tubular scaffold // Journal of Constructional Steel Research. 2021. Vol. 177. P. 106415. DOI: 10.1016/J. JCSR.2020.106415
13. Калужный Д.В., Джашеев Р.Ю. Влияние учета податливости узлов аутригеров на напряженно-деформированное состояние элементов стальных конструкций высотных зданий // Молодой ученый. 2023. № 24 (471). С. 85–94. EDN QHIYIR.
14. Лапишин А.А., Морозов Д.В., Колесов А.И. Методика проектирования стальных конструкций из гнутых тонколистовых незамкнутых профилей с учетом податливости узловых соединений на самонарезающих винтах // Приволжский научный журнал. 2014. № 3 (31). С. 16–25. EDN SNZKRV.
15. Новоселов А.А., Карелин Д.А. Оценка влияния податливости опорного узла стальной колонны // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. № 4 (43). С. 26–31. EDN ZWDQCB.
16. Никитина К.Е. Влияние податливости узлов на напряженно-деформированное состояние каркаса // Молодой ученый. 2020. № 23 (313). С. 123–129. EDN GNYFTN.
17. Балдин И.В., Уткин Д.Г., Балдин С.В. Исследование работы узлов сопряжения колонны и несущих ригелей системы «Купасс» // Вестник Том-



ского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 5 (52). С. 72–79. EDN VHMMUR.

18. Tushina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections // Magazine of Civil Engineering. 2017. № 5 (73). Pp. 25–39. DOI: 10.18720/MCE.73.3. EDN ZNLKNH.

19. Лимонина А.А., Цыгановкин В.В., Юхнина А.А. Исследование конечной жесткости соединений металлических конструкций // Молодой ученый. 2021. № 22 (364). С. 139–144. EDN SRKGYS.

20. Li S., Zhou Z., Luo H., Milani G., Abruzzese D. Behavior of traditional Chinese mortise-tenon joints: Experimental and Numerical insight for coupled vertical and reversed cyclic horizontal loads // Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 30. P. 101257. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101257

21. Белозеров П.Г. Планирование эксперимента узловых соединений элементов железобетонных конструкций с применением технологии быстромонтируемого вертикального скользящего соединения // Элек-

тронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2023. № 6. С. 1–6. EDN AEQRML.

22. Тур В.И., Тур А.В. Влияние податливости узловых соединений на напряженно-деформированное состояние металлического сетчатого купола // Фундаментальные исследования. 2014. № 6–6. С. 1165–1168. EDN SFCEKZ.

23. Фарфель М.И., Гукова М.И., Кондрашов Д.В., Коняшин Д.Ю. Апробированная методика проведения мониторинга в зданиях и сооружениях // Вестник НИЦ Строительство. 2021. № 1 (28). С. 110–123. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-1(28)-110-123. EDN PQRXAD.

24. Должиков В.Н. Влияние податливости болтовых соединений на работу вспомогательных опор для строительства мостов. Обзор // Международный журнал экспериментального образования. 2016. № 11–2. С. 243–248. EDN WZVOYD.

25. Вейнблат Б.М., Бунеев Г.И. Расчет сооружений с несущими высокопрочными болтами // Труды МАДИ. 1975. № 77. С. 37–42.

Поступила в редакцию 2 апреля 2024 г.

Принята в доработанном виде 28 июля 2024 г.

Одобрена для публикации 9 августа 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Николаевич Должиков** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительства и сервиса, почетный работник высшего профессионального образования России; **Сочинский государственный университет (СГУ)**; 354000, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Пластунская, д. 94; doljikov\_v@mail.ru;

**Елена Николаевна Должикова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительства и сервиса; **Сочинский государственный университет (СГУ)**; 354000, Краснодарский край, г. Сочи, ул. Пластунская, д. 94; elena.nikolaevna.50@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Dolzhikov V.N., Udotova O.A. Influence of the malleability of nodal joints on the stress-strain state of metal rod systems. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023; 11(779):15-25. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-779-11-15-25. EDN RVOXQH. (rus.).

2. Vasilkov B.S., Volodin N.M. *Calculation of prefabricated structures of buildings taking into account the malleability of joints*. Moscow, Stroyizdat, 1985; 144. (rus.).

3. Trofimov V.I., Tretyakova E.V., Zueva I.I. Consideration of the influence of the ductility of a bolted joint on the operation of a structural structure. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 1976; 1:24-26. EDN YREYHX. (rus.).

4. Dragan V.I., Shuryn A.B. Ductility of rod systems with nodal connections on dimensional leaf corner plates. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 7:37-43. EDN UBYGRL. (rus.).

5. Davoodi M.R., Pashaei M.H., Mostafavian S.A. Experimental study of the effects of bolt tightness on the behaviour of MERO-type double layer grids. *Journal of the international Association for Shell and Spatial Structures*. 2007; 48(153):45-52.

6. Ghasemi M., Davoodi M.R., Mostafavia S.A. Tensile stiffness of MERO-type connector regarding bolt tightness. *Journal of Applied Sciences*. 2010; 10(9):724-730. DOI: 10.3923/jas.2010.724.730

7. Tushin A.R., Platonova V.D. Influence of gaps in flange joints on the stress-strain state of the unit. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1763-1779. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1763-1779. EDN XHXVKE. (rus.).

8. Yoganata Y.S., Suswanto B., Iranata D., Iranwan D. Analysis study of extended end plate connection due to cyclic load using finite element method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engi-*

neering. 2020; 930(1):012050. DOI: 10.1088/1757-899X/930/1/012050

9. Luo L., Du M., Yuan J., Shi J., Yu S., Zhang Y. Parametric analysis and stiffness investigation of extended end-plate connection. *Materials*. 2020; 13(22):5133. DOI: 10.3390/ma13225133

10. Zhao D., Wang Z., Pan J., Wang P. Error analysis method of geometrically incomplete similarity of end-plate connection based on linear regression. *Applied Sciences*. 2020; 10(14):4812. DOI: 10.3390/app10144812

11. Kayumov R.A., Shakirzyanov F.R. Large Deflections and Stability of Low-Angle Arches and Panels During Creep Flow. *Advanced Structured Materials*. 2020; 237-248. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2\_18

12. Zheng Y., Guo Z. Investigation of joint behavior of disk-lock and cuplock steel tubular scaffold. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021; 177:106415. DOI: 10.1016/J. JCSR.2020.106415

13. Kalyuzhny D.V., Dzhasheev R.Y. The influence of accounting for the malleability of outrigger nodes on the stress-strain state of elements of steel structures of high-rise buildings. *Young Scientist*. 2023; 24(471):85-94. EDN QHIYIR. (rus.).

14. Lapshin A.A., Morozov D.A., Kolesov A.I. Methods of designing steel structures of cold-formed profiles with pliability of nodal connections on tapping screws. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2014; 3(31):16-25. EDN SNZKRV. (rus.).

15. Novoselov A.A., Karelin D.A. Impact assessment of the steel column datum node deformation capacity. *Bulletin of the Siberian State University of Railway Engineering*. 2017; 4(43):26-31. EDN ZWDQCB. (rus.).

16. Nikitina K.E. The influence of the malleability of nodes on the stress-strain state of the frame. *Young Scientist*. 2020; 23(313):123-129. EDN GNYFTN. (rus.).

17. Baldin I.V., Utkin D.G., Baldin S.V. Static load testing for beam-to-column connection in univer-

sal prefabricated antiseismic structural system. *Journal of Construction and Architecture*. 2015; 5(52):72-79. EDN VHMMUR. (rus.).

18. Tushina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 5(73):25-39. DOI: 10.18720/MCE.73.3. EDN ZNLKNH.

19. Limonina A.A., Tsyganovkin V.V., Yukhnina A.A. Investigation of the finite stiffness of joints of metal structures. *Young Scientist*. 2021; 22(364):139-144. EDN SRKGYS. (rus.).

20. Li S., Zhou Z., Luo H., Milani G., Abruzzese D. Behavior of traditional Chinese mortise-tenon joints: Experimental and Numerical insight for coupled vertical and reversed cyclic horizontal loads. *Journal of Building Engineering*. 2020; 30:101257. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101257

21. Belozеров P.G. Planning an experiment of nodal joints of elements of reinforced concrete structures using the technology of a quick-mounted vertical sliding joint. *Scientific Works of KubSTU*. 2023; 6:1-6. EDN AEQRML. (rus.).

22. Tur V.I., Tur A.V. Influence of nodal joints compliance upon stress-strained state of metal mesh dome. *Fundamental Research*. 2014; 6-6:1165-1168. EDN SFCEKZ. (rus.).

23. Farfel M., Gukova M., Kondrashov D., Konyashin D. Proven methods of monitoring in buildings and structures. *Bulletin of the Scientific Research Center "Construction"*. 2021; 1(28):110-123. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-1(28)-110-123. EDN PQRXAD. (rus.).

24. Dolzhikov V.N. Influence of the ductility of bolted joints on the operation of auxiliary supports for bridge construction. Review. *International Journal of Experimental Education*. 2016; 11-2:243-248. EDN WZVOYD. (rus.).

25. Weinblat B.M., Buneev G.I. Calculation of structures with load-bearing high-strength bolts. *Proceedings of MADI*. 1975; 77:37-42. (rus.).

Received April 2, 2024.

Adopted in revised form on July 28, 2024.

Approved for publication on August 9, 2024.

**B I O N O T E S:** **Vladimir N. Dolzhikov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction and Service, Honorary Worker of Higher Professional Education of Russian Federation; **Sochi State University (SSU)**; 94 Plastunskaya st., Sochi, Krasnodar region, 354000, Russian Federation; dolzhikov\_v@mail.ru;

**Elena N. Dolzhikova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction and Service; **Sochi State University (SSU)**; 94 Plastunskaya st., Sochi, Krasnodar region, 354000, Russian Federation; elena.nikolaevna.50@mail.ru.

*Contribution of the authors: all the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*