



МЕТОДИКА УТОЧНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕСТКОСТИ УЗЛОВЫХ И ОПОРНЫХ СВЯЗЕЙ СТАЛЬНОГО КАРКАСА «КРАНОВЫХ» ЦЕХОВ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Е. М. ЕРМАК

Приведена методика экспериментального определения и статистического обоснования характеристик жесткости узлов стального каркаса промышленных зданий по фактическим значениям изгибающих моментов от испытательной нагрузки.

The paper presents the procedure of experimental determination and statistical substantiation of the characteristics of rigidity of a steel frame in industrial buildings by actual values of bending moments due to test load.

Традиционное представление узловых сопряжений и опорных креплений элементов одноэтажных промышленных зданий посредством расчетных моделей с идеализированными предельными характеристиками жесткости («шарнир» или «заделка»), в определенных условиях проектирования или эксплуатации конструкций может ориентировать на неточное распределение усилий. Поэтому в общем случае при формировании расчетных схем таких сооружений необходимо вносить уточнения по вопросу моделирования узловых и опорных связей.

Теоретическое определение характеристик жесткости, вернее, упругой податливости элементов каркаса в узлах, является очень трудной задачей. Кроме рассмотрения и описания сложного пространственного характера напряженно-деформированного состояния в зоне узлов, нужно учитывать еще и случайную природу параметров, от которых эти характеристики зависят, в том числе факторы износа в условиях эксплуатации. Это дает основание полагать, что достаточно достоверную информацию о характеристиках фактической жесткости узловых и опорных связей конструкций можно получить только из опыта, путем проведения натурных испытаний.

В данной статье изложена методика динамических испытаний с обоснованием характеристик жесткости рамных и опорных узлов стального каркаса «крановых» цехов на основе статистического анализа. Приведем основные допущения и положения этой методики, а также порядок ее реализации.

1. Жесткость узлов каркаса оценивается по значению изгибающего момента в узле при воздействии соответствующей нагрузки. Узел считается жестким, если в процессе измерений значение изгибающего момента равно теоретическому, полученному на расчетной модели с абсолютно жесткими узловыми связями. Уменьшение фактического усилия по сравнению с указанным расчетным свидетельствует о некоторой упругой податливости узловых связей. Если же, согласно измерениям, изгибающий момент оказывается равным нулю или близким к нему, то узел считается «шарнирным».

2. Жесткость узлов каркаса определяется при воздействии вертикальной нагрузки на колонны каркаса от мостовых кранов. Показатели жесткости

(или податливости) узлов зависят и от характера нагружения. Они могут быть разными, например, при воздействии вертикальных и горизонтальных нагрузок, поскольку меняется характер работы соединительных элементов. Обосновать правомерность данного допущения можно тем, что нагрузка от веса крана с грузом является наиболее удобной для постановки натурального эксперимента и наиболее значимой для оценки эксплуатационных качеств сооружений, получивших название «крановых» цехов.

3. В процессе испытаний используется тензометрический способ измерений.

4. Запись осциллограмм усилий проводится от движущейся испытательной нагрузки в поперечных сечениях колонн каркаса. Это дает возможность установить связь между усилиями в разных сечениях конструкции, а также характер их изменения в зависимости от положения испытательной нагрузки, передаваемой мостовыми кранами.

5. Если тензодатчики, установленные в поперечных сечениях колонны, объединить в мост [2], то можно получить записи осциллограмм изгибающих моментов M , значения которых в этом случае вычисляются по формуле

$$M_{ij} = y_{ij} m_i W_i^{пл}, \quad (1)$$

где y_{ij} — отклонение осциллограммы усилия в поперечном сечении i -й колонны в момент времени j движения крана, от нулевой линии, мм; m_i — масштаб записи, кг/см²·мм; $W_i^{пл}$ — плечевой момент сопротивления, см³, $W_i^{пл} = I_i/h_d$, h_d — расстояние между датчиками, установленными на противоположных поясах (ветвях) колонны.

Таким образом, имея осциллограммы и результаты тарировки, можно по формуле (1) определить изгибающие моменты в исследуемых поперечных сечениях конструкции, а затем, сопоставляя эти данные с расчетными усилиями, установить степень защемления колонны в «рамном» и «опорном» узлах.

6. Эти вычисления можно упростить с помощью некоторой безразмерной функции, зависящей от отношения измеренных усилий. Используем известную особенность эпюры изгибающих моментов от нагружения колонны крановой нагрузкой — наличие двух нулевых точек соответственно в подкран-



новом и надкрановом элементе. Характерный вид такой эпюры и ее нулевые точки O_B и O_H показаны на рис. 1.

Допустим, что выполняются такие условия:

известны (после расшифровки осциллограмм) значения изгибающих моментов в четырех разных поперечных сечения 1–4 колонны (рис. 1);

эпюра изгибающих моментов на надкрановом и подкрановом участках колонны начерчена по прямым линиям.

Тогда положение нулевых точек этой эпюры может быть найдено из следующих соотношений (рис. 1, б):

$$K_{1-2} = \frac{z_{1-2}}{z_{1-2} + z_B}, \quad K_{3-4} = \frac{z_{3-4}}{z_{3-4} + z_H}, \quad (2)$$

где K_{1-2} и K_{3-4} — безразмерные функции изгибающих моментов. Они определяются по результатам испытаний:

$$K_{1-2} = \frac{M_2 - M_1}{M_2}, \quad K_{3-4} = \frac{M_3 - M_4}{M_3}. \quad (3)$$

7. Отметим, что положение нулевых точек эпюры изгибающих моментов не меняется при различном направлении действия испытательной нагрузки относительно колонны как объекта испытаний, т. е. оно не зависит от нагрузки.

Вероятные смещения нулевых точек и соответственно изменения отношения изгибающих моментов можно объяснить только влиянием факторов случайной природы, в том числе:

характеристик упругого защемления колонны в «рамном» и «опорном» узлах;

уровня давлений на колонну, передаваемых колесами крана, которые не могут считаться строго определенными [3];

случайных неточностей измерений.

Поэтому для достоверности результатов испытаний параметры распределения усилий нужно рассматривать и определять как статистические характеристики. Будем считать величины K_{1-2} и K_{3-4} случайными функциями неслучайного аргумента — времени, или иначе — положения испытательной нагрузки относительно колонны. Осциллографическая запись усилий дает возможность получить статистическую информацию для определения вероятных значений K_{1-2} и K_{3-4} и далее — оценки жесткости узловых упругих связей.

8. Допускаем, что значения случайных величин K_{1-2} и K_{3-4} распределены по нормальному закону.

9. Вероятностные характеристики случайных величин K_{1-2} и K_{3-4} определяются путем обработки материалов экспериментальных исследований. Имея осциллограммы усилий для исследуемых поперечных сечений колонны, следует нанести на них последовательный ряд сечений с определенным шагом и измерить соответствующие ординаты.

Шаг сечений должен быть выбран таким, чтобы их количество j было достаточным для получения достоверных значений числовых характеристик случайных величин K_{1-2} и K_{3-4} :

математического ожидания

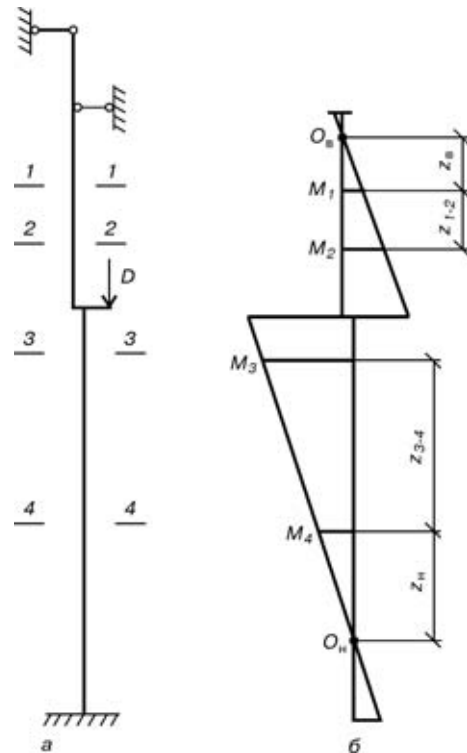


Рис. 1. Расчетная схема колонны (а) и общий вид эпюры изгибающих моментов в стержне колонны от крановой нагрузки D (б)

$$\bar{K}_{1-2} = \frac{\sum K_{1-2}^j}{m}, \quad \bar{K}_{3-4} = \frac{\sum K_{3-4}^j}{m} \quad (4)$$

и дисперсии

$$D_{1-2} = \frac{j}{m} \frac{\sum (K_{1-2}^j - \bar{K}_{1-2})^2}{m}, \quad D_{3-4} = \frac{j}{m} \frac{\sum (K_{3-4}^j - \bar{K}_{3-4})^2}{m}. \quad (5)$$

Результаты их вычислений удобно представить в табличной форме.

10. Имея статистически обоснованные значения K_{1-2} и K_{3-4} , по формулам (2) можно установить положение нулевых точек и построить эпюру распределения фактических усилий в колонне.

По экспериментальным значениям изгибающих моментов в поперечных сечениях, близких к «рамному» и «опорному» узлам, а также по результатам сравнения их с теоретическими, рассчитанными на моделях с идеализированными и упругими характеристиками узловых соединений, можно судить о следующем:

- точности использованных расчетных моделей;
- степени упругого защемления колонны «узловыми» упругими связями;
- необходимости корректировки расчетных моделей в этом отношении.

Используя изложенную выше методику динамических испытаний, проверим точность расчетной модели двухпролетной поперечной рамы каркаса сборочного цеха (ПО «Запорожтрансформатор») в отношении характеристик жесткости рамного и опорного узлов колонны среднего ряда (рис. 2, а).

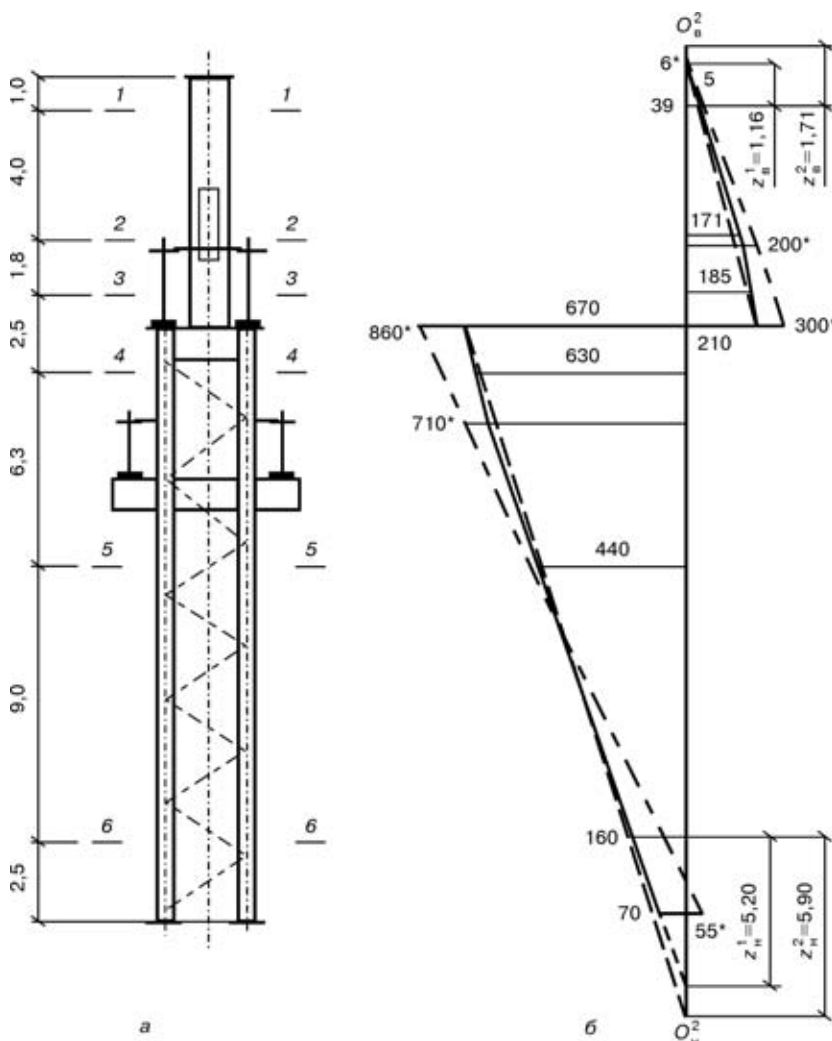


Рис. 2. Схема колонны — объекта испытаний (а) и соответствующие эпюры изгибающих моментов M , кН·м, от испытательной нагрузки, установленные экспериментально и расчетным путем (отмечены звездочкой) (б); 1–6 — сечения, в которых устанавливали тензодатчики (расстояния z указаны в метрах)

Их конструктивное оформление выполнено таким образом, что опорный узел по проекту должен обеспечивать жесткое защемление колонны, а в верхнем узле она считается не закрепленной от поворота (стропильные фермы — левая и правая

— установлены симметрично на оголовки колонны сверху).

Работу выполняем в следующей последовательности.

1. Устанавливаем тензодатчики в шести поперечных сечениях колонны — по 4 в каждом сечении (рис. 2, а);

2. Записываем осциллограммы изменения изгибающих моментов в этих сечениях от испытательной нагрузки (вес одного мостового крана верхнего яруса, который перемещался вдоль цеха). В качестве регистрирующего прибора применяли осциллограф Н-700 с чувствительными шлейфами.

3. Для определения числовых характеристик случайных величин K используем две осциллограммы (№ 1, 2), записанные на данном объекте в разное время (рис. 3). Каждая из них дает информацию об изменении усилий в четырех сечениях: первая — в сечениях 1, 2, 4, 6, вторая — 1, 3, 5, 6 (рис. 2, а).

Эти сечения выбираем и объединяем в указанные группы с учетом переломов эпюры изгибающих моментов M , связанных с включением в работу колонны «внешних» упругих связей, моделирующих продольные диски тормозных конструкций [1]. Шаг сечений на осциллограммах принимаем равным 2 мм, что в данном масштабе соответствует длине пути крана 0,5 м.

4. Масштаб осциллограмм m , кг/см²·мм, устанавливаем по тарировке каждого шлейфа в отдельности (при условии, что другие шлейфы-вибраторы включены в свои цепи).

Результаты тарировки (на базе деформаций тарировочной балки) приведены в таблице.

5. Для определения изгибающих моментов в исследуемых сечениях колонны вычисляем плече-

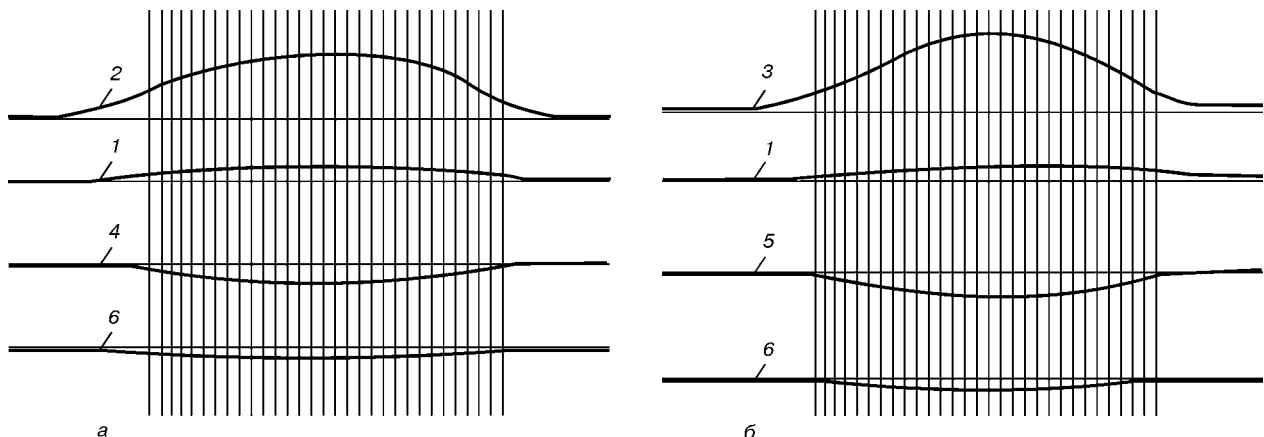


Рис. 3. Осциллограммы № 1 (а) и 2 (б), записанные для сечений 1–6 колонны среднего ряда каркаса (см. рис. 2, а)



вые моменты сопротивления ($W_{1,3}^{пл} = 6950 \text{ см}^3$; $W_2^{пл} = 6750 \text{ см}^3$; $W_{4,5,6}^{пл} = 5700 \text{ см}^3$) и измеряем соответствующие ординаты осциллограммы (отклонения ее от нулевой линии, мм).

Максимальные изгибающие моменты, согласно формуле (1):

по результатам первых испытаний (осциллограмма № 1)

$$M_1^1 = 2,5 \cdot 22,2 \cdot 6950 \text{ кг·см} = 38,6 \text{ кН·м};$$

$$M_2 = 1225 \cdot 20,5 \cdot 6750 \text{ кг·см} = 171,0 \text{ кН·м};$$

$$M_4 = -6,7 \cdot 16,3 \cdot 5700 \text{ кг·см} = -627,0 \text{ кН·м};$$

$$M_6^1 = -1,75 \cdot 16,3 \cdot 5700 \text{ кг·см} = -161,0 \text{ кН·м},$$

по результатам вторых испытаний (осциллограмма № 2)

$$M_1^2 = 39,2 \text{ кН·м}; M_3 = 185,0 \text{ кН·м};$$

$$M_5 = -440,0 \text{ кН·м}; M_6^2 = -159,6 \text{ кН·м}.$$

Отметим, что значения величин M_1 и M_6 , которые вычислялись дважды, совпали достаточно точно.

6. Безразмерные статистические величины K_j определяем из следующих выражений:

$$K_{1-2} = \frac{M_2 - M_1}{M_2} = 1 - \frac{y_1^1 m_1^1 W_1^{пл}}{y_2^2 m_2^2 W_2^{пл}} = 1 - 1,11 \frac{y_1^1}{y_2^2};$$

$$K_{1-3} = \frac{M_3 - M_1^2}{M_3} = 1 - 0,91 \frac{y_1^2}{y_3^2};$$

$$K_{4-6} = 1 - \frac{y_6^1}{y_4^1}; K_{5-6} = 1 - 0,82 \frac{y_6^2}{y_4^2}.$$

Для выборки y_{ij} ($i = 1, 2, 4, 5; j = 1, \dots, 30$) по данным осциллограммы № 1 вычисляем, согласно (4) и (5), числовые характеристики случайных величин K_{1-2} и K_{4-6} : $\bar{K}_{1-2} = 0,783$; $\bar{K}_{4-6} = 0,732$; $D_{1-2} = 0,008$; $D_{4-6} = 0,005$.

Аналогично по данным осциллограммы № 2 $\bar{K}_{1-3} = 0,768$; $\bar{K}_{5-6} = 0,638$; $D_{1-3} = 0,003$; $D_{5-6} = 0,001$.

7. Из соотношения (2) определяем расстояния до нулевых точек эпюры изгибающих моментов ($z_B^1 = 1,20 \text{ м}$; $z_B^2 = 1,73 \text{ м}$; $z_H^1 = 5,64 \text{ м}$; $z_H^2 = 5,14 \text{ м}$) и строим эпюру изгибающих моментов M в стержне

Определение масштаба осциллограмм усилий путем тарировки шлейфов-вибраторов

| Номер шлейфа-вибратора | Номер сечения колонны | Масштаб m , кг/см ² ·мм, осциллограммы | |
|------------------------|-----------------------|---|---------|
| | | № 1 | № 2 |
| 8Г | 1 | 22,2 | 18,6 |
| 9Г | 2 | 20,5 | Не опр. |
| | 3 | Не опр. | 20,5 |
| 10Г | 4 | 16,3 | Не опр. |
| | 5 | Не опр. | 17,0 |
| 11Г | 6 | 16,3 | 14,0 |

колонны по экспериментальным данным (рис. 2, б). Для сравнительного анализа на рис. 2, б приведена эпюра изгибающих моментов, полученная при расчете поперечной рамы на испытательную нагрузку (значения отмечены звездочкой).

Результаты экспериментов позволяют сделать следующие выводы.

1. Узел сопряжения стропильных ферм и колонны среднего ряда каркаса обеспечивает некоторое незначительное защемление указанных элементов; при вертикальной крановой нагрузке экспериментальные значения изгибающих моментов в оголовке колонны малы ($M_B = 5,0 \text{ кН·м}$) и достаточно точно учитываются расчетной моделью ($M_B^* = 6,0 \text{ кН·м}$).

2. В зоне опорного узла колонны при испытаниях выявлено существенное отличие (по значению и знаку) экспериментальных изгибающих моментов от расчетных, что, по-видимому, связано с отсутствием учета упругих деформаций фундамента и основания (грунты II категории просадочности). В этом отношении расчетная модель данного объекта нуждается в корректировке.

1. Ермак Е. М. Оптимизация расчетной модели стального каркаса одноэтажных промышленных зданий // Сб. тр. Междунар. конф. «Металлостроительство-96», Донецк – Макеевка, 1996. — Т. 1. — С. 28–29.
2. Семенец Г. Л., Ильевский А. В., Левкин С. В. К методике изучения действительной работы металлических пролетных строений мостов // Тр. ХИИТа. — М.: Транспорт, 1973. — Вып. 128. — С. 43–46.
3. Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий / А. И. Кикин, А. А. Васильев и др. — М.: Стройиздат, 1984. — 302 с.
4. Ренский А. Б. Деформативность и прочность фланцевых сопряжений ферм с колоннами в стальных каркасах производственных зданий // Сб. науч. тр. МИСИ. — М, 1953. — Вып. 22. — С. 16–58.

Укр. гос. академия жел.-дор. транспорта,
Харьков

Поступила в редакцию
12.07.2002