



ИЗМЕРЕНИЕ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ

Е. М. ЕРМАК, А. О. ИСМАГИЛОВ

Рассмотрены вопросы экспериментального определения упругих перемещений точек колонн промышленных зданий для уточнения расчетного моделирования опорных связей каркаса.

The paper deals with the issues of experimental determination of elastic displacements of points of industrial building columns for a more precise simulation by calculation of support ties of the frame.

Важным этапом работ по оценке технического состояния конструкций зданий в условиях эксплуатации являются проверочные расчеты на максимально уточненных расчетных схемах.

Известно [1, 2], что представление узловых и опорных связей каркасов на расчетных схемах предельными характеристиками жесткости (идеальные шарниры или жесткие заделки) часто не отвечает их фактической, упругоподатливой работе под нагрузкой, поэтому в общем случае узлы сопряжения и опирания элементов каркаса должны моделироваться упругими связями [4].

В данной работе показана возможность такого моделирования для узлов опирания колонн каркаса существующих одноэтажных промышленных зданий на фундаменты.

Допускается, что остаточные деформации грунтов основания под подошвой фундамента при временных воздействиях являются пренебрежимо малыми или стабилизировались и при повторных нагрузках не накапливаются. Тогда указанное уточнение расчетных схем может быть реализовано, если установить характеристики опорных связей, учитывающие возможность упругих линейных и угловых перемещений, т. е. упругие осадки и повороты опорных сечений колонн каркаса.

Принимаем в качестве таких характеристик: коэффициент жесткости основания K_i (отношение величины давления на колонну к соответствующей величине осадки);

коэффициент пропорциональности u_i , связывающий величину изгибающего момента, воспринимаемого опорным сечением колонны, и теоретический угол поворота этого сечения (допускаем, что поворот фундамента и базы колонны является совместным).

Исходим также из того, что характеристики K_i и u_i — случайно изменчивые величины, так как находятся в зависимости от ряда факторов, которые трудно оценивать теоретически с необходимой точностью (свойство и состояние грунтов основания, работа элементов базы колонны, жесткость соединения ее с фундаментом и др.). Поэтому достаточно достоверные значения этих характеристик можно установить только по результатам натурных экспериментов.

Далее изложены особенности методики испытаний, которая основана на допущениях: упругая податливость опорных связей колонн каркаса оценивается по величине упругих перемещений при действии испытательной нагрузки; испытательной нагрузкой является вертикальное давление, оказываемое на колонну мостовыми кранами.

Таким образом, для экспериментального определения линейной и угловой упругости опорных связей нужно измерить вертикальные и горизонтальные перемещения точек колонн, по величинам которых можно судить как о работе конструкции, так и о работе грунтов основания.

Трудность измерений состоит в том, что любая точка нагруженной и деформируемой конструкции совершает сложное перемещение в пространстве.

Могут быть предложены два варианта реализации методики таких испытаний.

Вариант 1. Определение перемещений точек колонн каркаса с помощью прогибомеров по дистанционной схеме [3], т. е. измерение указанных перемещений относительно условно неподвижных (опорных) точек.

Допустим, что нужно определить перемещение выбранной точки колонны в плоскости поперечной рамы каркаса (плоскости наиболее интенсивной работы конструкции при загрузке), и что это перемещение однозначно определяется двумя составляющими по заданным направлениям — вертикальному и горизонтальному.

Вертикальная составляющая перемещения может быть определена прогибомером, если проводочная связь между точкой колонны и прибором будет расположена вертикально. В этом случае горизонтальная составляющая практически не влияет на показания прогибомера. Однако при таком расположении прибора и связи измерения величины перемещений будут неточные, так как опорная точка, находясь у основания колонны, может перемещаться при действии нагрузки вместе с полом и грунтом. Поэтому прогибомеры необходимо размещать на некотором расстоянии от базы колонны и проводочные связи, следовательно, будут натянуты под углом к горизонту. При такой установке прибора его показания будут уже зависеть от двух составляющих. Следовательно, измеряя перемещение какой-либо точки колонны в плоскости рамы, нужно устанавливать на эту точку

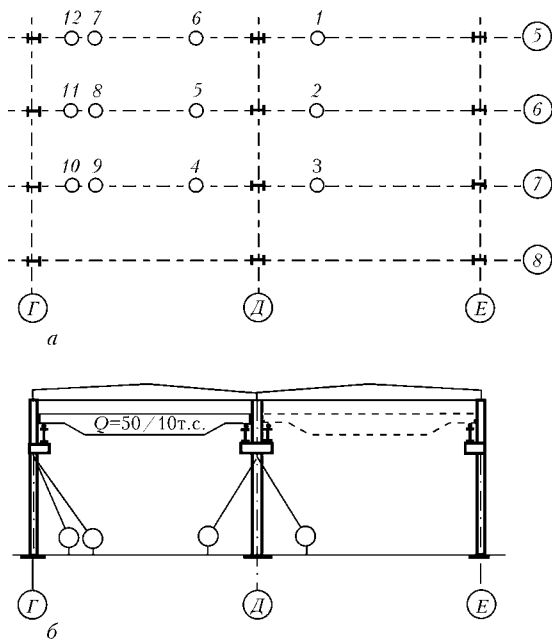


Рис. 1. Схема установки прогибомеров на объекте испытаний: а – план; б – разрез

два прибора (рис. 1) и тогда направления проволочных связей определяют направления составляющих перемещений, которые измеряются. Эти два направления должны быть обязательно различными.

Горизонтальные и вертикальные составляющие перемещений точек колонны определяются путем пересчетов, если известны геометрические характеристики положения проволочных связей относительно колонны. Выведем соответствующие зависимости.

Вертикальная составляющая осадки состоит из перемещения, вызванного упругой податливостью опоры, и перемещения вследствие поворота стойки как жесткого целого. Ввиду малости угла этого поворота (до 1°) влиянием последнего пренебрегаем.

Пользуясь обозначениями размеров на рис. 2, получаем:

$$(h - \Delta l_{11})^2 + (a + \Delta l_2)^2 = c^2, \quad (1)$$

$$(h - \Delta l_{12})^2 + (b - \Delta l_2)^2 = d^2, \quad (2)$$

$$\frac{\Delta l_{12} - \Delta l_{11}}{2} = \frac{\Delta l_2}{h}, \quad (3)$$

$$\frac{\Delta l_{12} + \Delta l_{11}}{2} = \Delta l_1. \quad (4)$$

Для определения составляющих перемещений точек колонны Δl_1 и Δl_2 по приведенным формулам необходимо, кроме показаний прогибомеров, иметь данные о длинах проволочных связей и размерах катетов образованных треугольников (размеры a , b , h на рис. 2).

Полученные таким образом значения перемещений и известные величины силовых воздействий, им соответствующие, дают возможность определить коэффициенты податливости основания

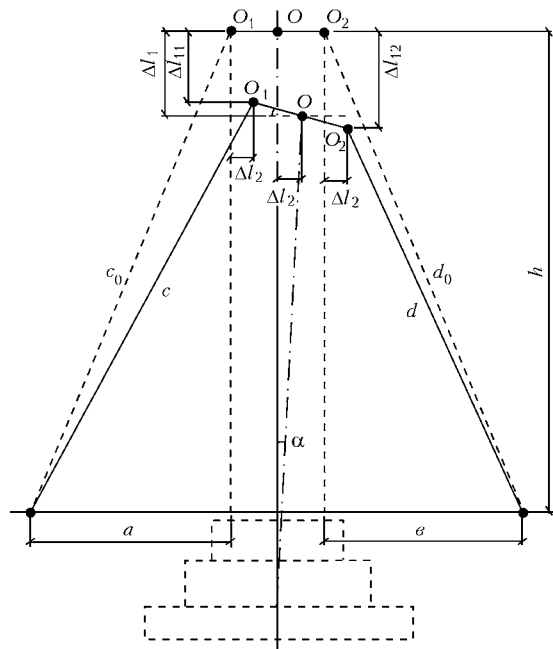


Рис. 2. Схема перемещений точек O_1 и O_2 при упругих деформациях колонны от испытательной нагрузки (вариант 1)

и составить модель упругоподатливых опор для уточнения расчетной модели.

Для уточнения пространственных расчетных моделей используется та же методика, но на каждую точку нужно ставить три прогибомера с разными направлениями проволочных связей.

Вариант 2. Для измерения перемещений точек колонн используется высокоточный нивелир, а также нивелирные рейки и специальные измерительные площадки, которые крепятся неподвижно в нижней части колонн.

До загрузки колонны испытательной нагрузкой (положение площадки на рис. 3 показано штриховой линией) и в нагружаемом состоянии (одно из возможных положений площадки показано сплошной линией) берутся отсчеты по рейкам, установленным в точках O_1 и O_2 .

Вертикальные перемещения этих точек

$$\Delta l_{11} = h'_{O_1} - h_{O_1}, \quad \Delta l_{12} = h'_{O_2} - h_{O_2}, \quad (5)$$

где h_{O_1} , h_{O_2} – «нулевые» отсчеты; h'_{O_1} , h'_{O_2} – отсчеты, указывающие на положение точек под нагрузкой.

Из (5) следует, что перемещения точек площадки вверх имеет знак «+», а перемещения вниз – знак «-».

Ясно, что расстояние между точками O_1 и O_2 , т. е. размеры измерительной площадки в плане могут влиять на точность измерений.

Вертикальное перемещение точки O колонны:

$$\Delta l_1 = \frac{\Delta l_{12} + \Delta l_{11}}{2}. \quad (6)$$

Угловые перемещения колонны в данном сечении (рис. 3):

при $\Delta l_{11} \leq 0$ и $\Delta l_{12} \leq 0$:



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|\Delta l_{12} - \Delta l_{11}|}{2a + h_k}, \quad (7a)$$

при $\Delta l_{11} > 0$ и $\Delta l_{12} > 0$ или наоборот:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|\Delta l_{12}| + |\Delta l_{11}|}{2a + h_k}. \quad (7b)$$

Выбор способа измерения перемещений точек колонны из представленных выше вариантов зависит от наличия или отсутствия тех или иных измерительных приборов и приспособлений для их установки, а также от условий проведения испытаний: расположения оборудования в цехе, возможности установки приборов и удобство работы с ними и др.

Приведем пример реализации методики измерений по варианту 1 и уточнения расчетной схемы для двухпролетной поперечной рамы каркаса машинного зала на ПО «Запорожтрансформатор».

Порядок проведения испытаний. В связи с некоторой неопределенностью работы опорных связей колонн каркаса и неизученным поведением под нагрузкой грунтов основания испытания проводились в два этапа.

На *первом этапе* — предварительных испытаниях — кроме основной задачи, решались вспомогательные: отработка методики эксперимента; проверка работы приборов; уточнение правильности намеченного пути исследования.

Второй этап испытаний проводили как определяющий, для корректировки методики и уточнения результатов с наиболее возможной достоверностью. Для измерений перемещений использовались прогибомеры ПМ-3 системы Максимова. Точность измерений 0,01 мм.

Схема расстановки приборов (на втором этапе испытаний) приведена на рис. 1.

Испытательная нагрузка. Для создания испытательных нагрузок на колонны каркаса использовались мостовые краны грузоподъемностью $Q = 20$ тс с грузом 12,5 тс (на этапе предварительных испытаний) и $Q = 50/10$ тс с грузом 35,0 тс (на этапе основных испытаний).

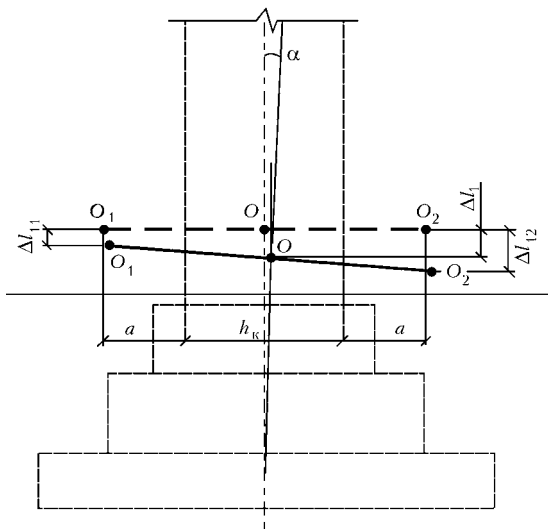


Рис. 3. Схема перемещений точек O_1 и O_2 при упругих деформациях колонны от испытательной нагрузки (вариант 2)

Для получения необходимой выборки статистических данных измерения проводились при различных установках испытательной нагрузки (двенадцать установок крана в пролете «Г-Д» — по четыре установки для последовательного нагружения колонн по осям «5», «6» и «7»). Схема передвижения и установок крана при проведении основных испытаний приведена на рис. 4.

Результаты испытаний. Для колонн среднего ряда «Д» при давлении от мостового крана $P_d = 290$ кН (кран грузоподъемностью $Q = 50/10$ тс с грузом) получено математическое ожидание величины осадки фундамента и соответствующая величина коэффициента жесткости основания:

$$Y_d = 0,031 \text{ см}, K_d = 9355 \text{ кН/см}.$$

Для определения теоретического значения u_i нужно знать величину коэффициента постели основания под фундаментом C_0 , который может быть определен из условия равновесия фундамента как штампа на сплошном упругом основании при его вертикальной осадке (рис. 5):

$$N - C_0 y ab = 0,$$

откуда

$$C_0 = N / y ab, \quad (8)$$

где N — нагрузка, вызывающая осадку « y » фундамента; a и b — размеры подошвы фундамента вдоль «цифровой» и «буквенной» осей соответственно.

Используя условие равновесия фундамента, нагруженного изгибающим моментом M_i (рис. 5, б), получаем:

$$M - 2 \frac{a\phi}{4} C_0 \frac{ab}{2} \frac{2}{3} \frac{a}{2} = 0,$$

откуда

$$M = \frac{C_0 b a^3}{12} \phi. \quad (9)$$

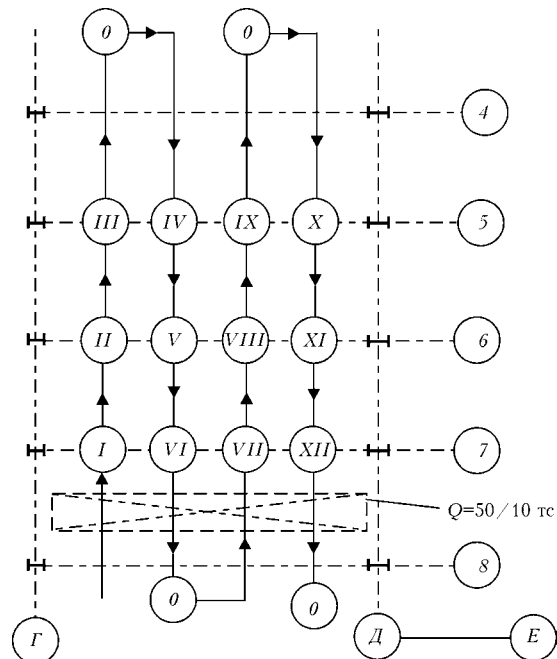


Рис. 4. Схема установок испытательной нагрузки на объекте испытаний

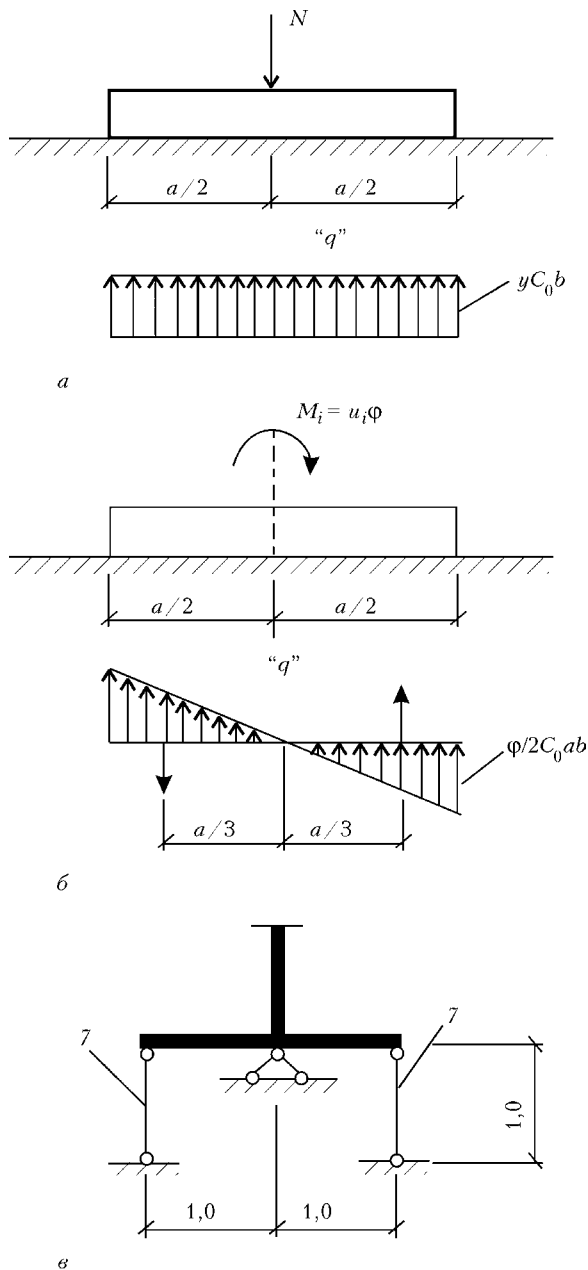


Рис. 5. Схемы усилий при осадке фундамента (а) и при повороте фундамента (б), схематизация опорных связей на расчетной модели (в)

По определению

$$M = u_i \phi. \quad (10)$$

Поэтому из (9) и (10) следует

$$u_i = C_0 (ba^3 / 12),$$

или, учитывая (8)

$$u_i = \frac{N}{y} \frac{a^2}{12}. \quad (11)$$

Для колонны среднего ряда «Д-6»:

$$N_d = 290 \text{ кН}, \quad y = 0,031 \text{ см}, \quad a_d = 6,0 \text{ м}.$$

По формуле (11):

$$u_d = \frac{290,0}{0,031} \frac{6,0^2}{12} 10^{-2} = 2,90 \cdot 10^6 \text{ кН}\cdot\text{м}.$$

Для представления на расчетной модели «внутренних» [4] упругих связей опорных узлов используем стержневую схематизацию (рис. 5, в) и определим характеристики таких связей при следующих допущениях: упругие осадки опор каркаса малы (в данном случае их величины — меньше 1 мм) и поэтому их влиянием на распределение изгибающих моментов в элементах поперечных рам очевидно можно пренебречь; степень упругого защемления колонны в опорном узле зависит от податливости опорных связей при повороте; ввиду малости угла поворота опорного сечения колонны считаем, что $\text{tg} \phi = \phi$; стержни «7» на модели опорных узлов поперечных рам принимаются идеально упругими, устойчивость их при сжатии считается обеспеченной, а осевая жесткость определяется величиной коэффициента u_i , остальные стержневые элементы этой модели принимаются абсолютно жесткими (рис. 5, в).

Определим жесткость упругих стержней «7».

Если к опорному сечению приложено усилие в виде единичного момента $M = 1 \text{ кН}\cdot\text{м}$ и упругие стержни «7» имеют единичную длину (1,0 м), а расстояние между ними и осью стержня колонны также равно 1,0 м (рис. 5, в), то исходя из выражения (10) и учитывая, что

$$\phi = y_7 / 1,0, \text{ где } y_7 = \frac{M \cdot 1,0}{2EA_7},$$

получаем

$$EA_7 = \frac{u_i}{2}. \quad (12)$$

В данном конкретном случае для опоры средней колонны $EA_7 = 1,45 \cdot 10^6 \text{ кН}$.

Рассмотренная методика экспериментального определения параметров упругого защемления опорных узлов каркаса и соответствующего уточнения расчетных моделей пока реально применима для решения задачи оценки и обеспечения надежности конструкций в условиях эксплуатации. Но с накоплением данных для различных конструктивных решений, размеров, условий нагружения и др., а также данных статистических исследований эти параметры могут быть нормированы и использованы при проектировании.

1. Исследование действительной работы стальных конструкций промышленных зданий // Сб. трудов под ред. С. А. Бернштейна. — 1938. — 196 с.
2. Шапиро Г. А. Действительная работа стальных конструкций промышленных цехов. — М.-Л.: 1952. — 287 с.
3. Безухов Н. И. Испытания строительных конструкций и сооружений. — М.: Госстройиздат, 1954. — 452 с.
4. Ермак Е. М. Действительная работа и расчетные модели стальных каркасов промышленных зданий. — Магсевка: ДонГАСА, 2002. — 189 с.