



О РАСЧЕТЕ ВЫРАВНИВАЕМЫХ ЗДАНИЙ ПЛОСКИМИ ДОМКРАТАМИ

УДК 69.04; 69.059.32

АВТОР

ХОРУНЖИЙ В.И., канд. техн. наук
ГП "Государственный научно-исследовательский
институт строительных конструкций"

АННОТАЦИЯ

Предложена расчетная модель плоских домкратов, используемых для выравнивания зданий. Рассмотрен пример использования этой модели в алгоритме расчета усилий и перемещений конструктивной системы от воздействий домкратов.

Calculation model of flat jacks for buildings alignment is proposed. An example the use of this model in the algorithm of calculation of efforts and moving of the structural system from influences of jacks is considered.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

плоские домкраты, выравнивание зданий, расчетная модель, алгоритм расчета

Метод выравнивания зданий плоскими домкратами, разработанный НИИСК в 1976-1978 г.г. (г.Киев), впервые применен при натурных исследованиях и выравнивании зданий, возведенных на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах в городах Ворошиловограде, Горловке, Запорожье, Никополе, Днепропетровске и др. Этот метод получил дальнейшее развитие в научно-производственной фирме «Интербиотех» (г. Ростов на Дону), которая осуществила выравнивание многих зданий в России и в других странах. Большая заслуга в выполнении многочисленных работ по выравниванию зданий принадлежит В.П. Шумовскому, Ю.К. Болотову, В.Д. Зотову и др. [1-4].

Расчет выравниваемого здания является составной частью подготовительных работ к управляемым воздействиям домкратов, обеспечивающим заданные перемещения и напряженно-деформированные состояния здания на всех этапах выравнивания. В статьях [5, 6] представлено математическое описание процесса изменения усилий и перемещений (в заданных точках расположения домкратов и односторонних связей) в зависимости от производительности насосной станции и продолжительности этапов выравнивания при расчетных схемах, соответствующих поршневым домкратам. Для конструктивных систем с плоскими домкратами указанное описание применимо только в отдельных частных случаях в связи с существенными отличиями между конструкциями и расчетными моделями поршневых и плоских домкратов.

Поэтому для расчетов конструктивных систем с плоскими домкратами требуется разработка соот-



ветствующих математических моделей и алгоритмов. В данной статье рассматривается алгоритм расчета, имеющий следующие особенности:

- предлагаемая математическая модель домкрата позволяет выполнять расчеты как с плоскими, так и с поршневыми домкратами;
- с целью упрощения расчетов исключены из рассмотрения производительности насосной станции и продолжительности этапов выравнивания, представляющих интерес в научных исследованиях, но не обязательных в практических расчетах;
- алгоритмы расчетов представлены в матричной форме, приспособленных к непосредственному выполнению вычислительных работ на ЭВМ.

Для определения расчетной модели плоского домкрата установим зависимость изменения его размеров от высоты подъема (хода). В соответствии с рис. 1а получаем следующие зависимости в начальном состоянии:

$$\sin \alpha_0 = (r + \delta + s/2) / (r + \delta + r_0); \quad (1)$$

$$L_{12} = \pi r_0 (1 - \alpha_0 / 180^\circ); \quad L_{23} = \pi (r + \delta) (90^\circ - \alpha_0) / 180^\circ; \quad (2)$$

$$R_k = R + (r + \delta) \cos \alpha_0; \quad R_0 = R_k + r_0 \cos \alpha_0; \quad (3)$$

$$L = L_{12} + L_{23}, \quad (4)$$

где s – конструктивный размер, устанавливаемый при изготовлении домкрата; r_0 – начальный внутренний радиус валика (усеченного тора) домкрата; r – радиус закругления опорного вкладыша; R – радиус горизонтальной контактной поверхности опорного вкладыша; R_k – радиус горизонтальной проекции контактной поверхности опорного вкладыша; R_0 – радиус центральной круговой оси валика; δ – толщина листа домкрата; L – длины дуг.

Геометрические параметры (1-4) являются постоянными величинами, которые используются при определении размеров домкрата в рабочем состоянии (рис. 1в):

$$\sin \alpha_h = (r + \delta + h/2 + s/2) / (r + \delta + r_h); \quad (5)$$

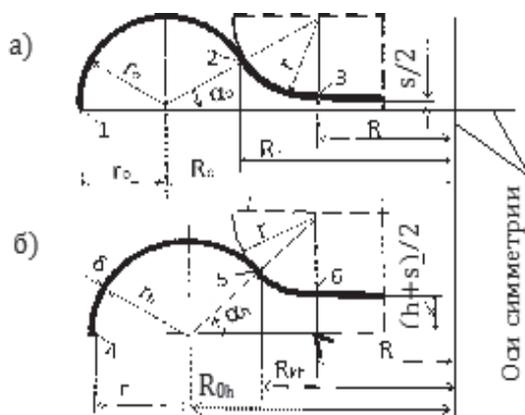


Рис. 1. Геометрические схемы плоского домкрата в начальном (а) и рабочем (б) состояниях.

$$R_{kh} = R + (r + \delta) \cos \alpha_h; \quad R_{oh} = R_{kh} + r_h \cos \alpha_h; \quad (6)$$

$$h = 2(r + \delta + r_h) \sin \alpha_h - 2(r + \delta) - h_0; \quad (7)$$

$$r_h = [L_{123} - \pi(r + \delta)(90^\circ - \alpha_h) / 180^\circ] / \pi(180^\circ - \alpha_h) / 180, \quad (8)$$

где h – рабочий ход домкрата.

Учитывая (1-8), получим усилия в домкрате:

$$D = p_h \pi R_{kh}^2 + 2\pi R_{kh} r_h p_h \cos \alpha_h (1 + 2r_h \cos \alpha_h / 3 R_{kh}), \quad (9)$$

где первое слагаемое – усилие от давления жидкости на горизонтальной проекции контактной поверхности πR_{kh}^2 , а второе – линейная нагрузка по периметру $2\pi R_{kh}$, вызванная давлением жидкости в валике домкрата. Правая часть выражения (9), деленная на p_h , является нелинейной функцией площади, которую условно можно рассматривать как площадь поршня домкрата и указанное выражение представить в следующем виде:

$$D = p_h f_h, \quad (10)$$

где

$$f_h = \pi R_{kh}^2 + 2\pi r_h \cos \alpha_h (R_{kh} + 2r_h \cos \alpha_h / 3). \quad (11)$$

Выражения (10,11) действительны при $\alpha_0 \leq \alpha_h \leq 90^\circ$, где α_0 – угол, определяемый по (5) при $h = s$.

В качестве примера в таблице приведены численные значения h и f_h при возрастании α_h от α_0 до 90° , определенные по (1)-(9) в Excel при следующих данных: $R = 20 \text{ см}$, $r = 1,5 \text{ см}$, $r_0 = 2,1 \text{ см}$, $s = \delta = 0,2 \text{ см}$.

Анализ табличных данных показывает, что при заданных размерах домкрата, а также при других размерах, применяемых в настоящее время, нелинейная зависимость f_h от h с высокой точностью можно аппроксимировать линейной функцией (линией тренда) и представить ее (10) в следующем виде:

$$f_h \approx F_h = F_{\max} - Kh. \quad (12)$$

При указанных размерах домкрата $F_{\max} = 1751,4 \text{ см}^2$, $K = 50,53 \text{ см}$. Параметры F_{\max} и K (постоянные коэффициенты линии тренда) определяются из условия минимального отклонения чис-

h см	f_h см ²
0.000	1720.43
2.17	1675.43
4.42	1584.04
6.58	1443.45
8.85	1256.00

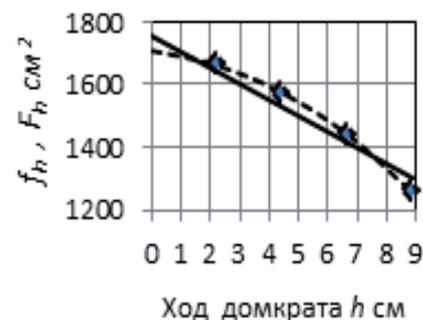


Рис. 2. Зависимости f_h и F_h от h .



ленных значений f_h от F_h . При указанных выше размерах домкрата относительная погрешность аппроксимации составляет менее 4%. Из выражения (11) следует, что расчетная модель плоского домкрата может рассматриваться как поршневого при уменьшении площади поршня пропорционально ходу домкрата:

$$D = p(F_0 - Kh/n). \quad (13)$$

Параметр F_0 принимается в зависимости от следующих начальных уровней отсчета хода домкрата: $h_0 = s$ или $h_0 > s$ (рис. 1а).

При $h_0 = s$ принимается $F_0 = F_{max}$, при $h_0 > s$ - $F_0 = F_{max} - Kh_0$.

где $K = (F_{max} - F_{min}) / h_{max}$ (h_{max} определяется при $\alpha = 90^\circ$, F_{min} - при h_{max}), n - число домкратов в пакете.

Запись основных уравнений, формирующих алгоритм расчета, рассмотрим на примере составной конструкции (системы), лежащей на упругом основании и нагруженной произвольной нагрузкой, равнодействующая которой G (рис. 3). Балки (нижняя и верхняя подсистемы) соединены односторонними связями 1-5, работающие только на сжатие. В горизонтальном стыке балки (подсистемы) воспринимают усилия от домкратов D_6, D_7, D_8 . Процесс увеличения этих усилий, сопровождающийся последовательным отключением односторонних связей, включает начальный, промежуточные и конечный этапы, общее число которых равно числу односторонних связей.

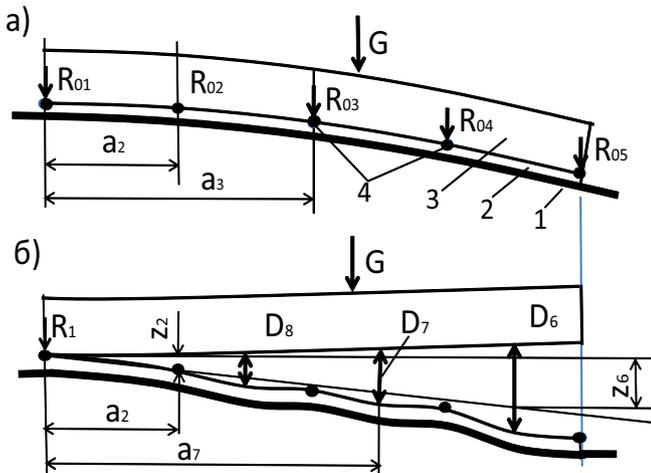


Рис. 3. Расчетные схемы конструктивной системы:

а - начальное положение при нулевых усилиях в домкратах, б - конечное положение, 1 - упругое основание, 2 - фундаментная лента, 3 - верхнее строение, 4 - односторонние связи.

Усилия и перемещения в горизонтальном шве системы на любом k -ом этапе определяются в зависимости от давления жидкости в домкратах, которое увеличивается в следующем интервале:

$$p_m^{(k-1)} \leq p^{(k)} \leq p_m^{(k)}, \quad (14)$$

где $p_m^{(k-1)}$ - начальное (конечное) граничное давление жидкости на этапе $k(k-1)$; $p_m^{(k)}$ - конечное (начальное) граничное давление на этапе $k(k+1)$.

Начальные и конечные граничные давления определяются из условий отключения односторонней связи при сохранении ее контакта с кон-

струкцией.

Особенностью конечного этапа является возможность отключения или не отключения последней связи. В первом случае происходит подъем верхней подсистемы, во втором - поворот вокруг связи 1 (рис. 2б). Заданные перемещения и напряженно деформированные состояния системы могут достигаться как на промежуточных, так и на конечном этапах выравнивания.

В соответствии с расчетной моделью (13) усилия в домкратах на всех этапах определяются матричным уравнением:

$$\begin{bmatrix} D_6^{(k)} \\ D_7^{(k)} \\ D_8^{(k)} \end{bmatrix} = p^{(k)} \cdot \begin{bmatrix} F_6^{(k)} - Kh_6^{(k)} / n_6 \\ F_7^{(k)} - Kh_7^{(k)} / n_7 \\ F_8^{(k)} - Kh_8^{(k)} / n_8 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

В зависимости от усилий в домкратах и физических свойств системы, выражаемых матрицей податливости, определяются ходы домкратов:

$$\begin{bmatrix} h_6^{(k)} \\ h_7^{(k)} \\ h_8^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{66}^{(k)} & \delta_{67}^{(k)} & \delta_{68}^{(k)} \\ \delta_{76}^{(k)} & \delta_{77}^{(k)} & \delta_{78}^{(k)} \\ \delta_{86}^{(k)} & \delta_{87}^{(k)} & \delta_{88}^{(k)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_6^{(k)} \\ D_7^{(k)} \\ D_8^{(k)} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где $\delta_{ij}^{(k)}$ - коэффициенты матрицы податливости, включающие слагаемые $\delta_{ij}^{(ku)}$ и $\delta_{ij}^{(kv)}$ (перемещения нижней и верхней балок от единичных усилий в домкратах).

Усилия в односторонних связях выражаются через усилия в домкратах с помощью матрицы влияния:

$$\begin{bmatrix} R_1^{(k)} \\ \vdots \\ R_5^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{16}^{(k)} & r_{17}^{(k)} & r_{18}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{56}^{(k)} & r_{57}^{(k)} & r_{58}^{(k)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_6^{(k)} \\ D_7^{(k)} \\ D_8^{(k)} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где $r_{ij}^{(k)}$ - коэффициенты матрицы влияния (усилие в связи от единичной нагрузки от домкрата).

Уравнения (15-17) содержат неизвестные $p^{(k)}, D_i^{(k)}, h_i^{(k)}, R_i^{(k)}$, для определения которых для каждого этапа составляется дополнительное уравнение из условия отключения одной из связей в момент сохранения ее контакта с конструкцией. Так, например, на начальном этапе условие отключения связи 5 записывается в виде:

$$R_{05} = p_5^{(1)} (r_{56}^{(1)} + r_{56}^{(1)} + r_{56}^{(1)}) \begin{bmatrix} F_6^{(1)} - Kh_6^{(1)} / n_6 \\ F_7^{(1)} - Kh_7^{(1)} / n_7 \\ F_8^{(1)} - Kh_8^{(1)} / n_8 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

где R_{05} - усилие в односторонней связи 5 при нулевых усилиях в домкратах.

Совместное решение уравнений (16)-(18) выполняется шагово-итерационным методом с использованием известных программных комплексов, например, ПК ЛИРА. В уравнении (17) принимают нулевые усилия в отключенных связях. В случаях нелинейной деформируемости рассматриваемых систем жесткостные характеристики основания, фундаментов и верхнего строения корректируются на каждом этапе или шаге вычис-



лений в соответствии с законами деформирования материалов. Правильность расчетов на каждом этапе проверяется условиями равновесия каждой балки (подсистемы).

Расчет на конечном этапе выполняется с учетом дополнительных раскрытий стыков (z_i) от вращения верхней подсистемы как абсолютно жесткого тела вокруг опоры 1, определяемых по формуле:

$$\sum_{i=6}^8 z_i = tg \beta \cdot \sum_{i=6}^8 a_i, \quad (19)$$

где a_i - расстояния от опоры 1 к точке приложения усилий от домкратов; $tg \beta = z_2/a_2$ - задаваемый угол вращения верхней подсистемы; a_2 - расстояние от связи 1 к связи 2;

С учетом (19) уравнение (15) записывается в виде:

$$\begin{bmatrix} D_6^{(5)} \\ D_7^{(5)} \\ D_8^{(5)} \end{bmatrix} = p^{(5)} \cdot \begin{bmatrix} F_6^{(5)} - K(h_6^{(5)} / n_6 - a_6 tg \beta) \\ F_7^{(5)} - K(h_7^{(5)} / n_7 - a_7 tg \beta) \\ F_8^{(5)} - K(h_8^{(5)} / n_8 - a_8 tg \beta) \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Дополнительное уравнение к (14) составляется, приравнявая нулю моменты всех сил, действующих на верхнюю балку относительно левой опоры:

$$p_m^{(5)} = M / \sum_{i=6}^8 [F_6^{(5)} - K(h_6^{(5)} / n - a_6 tg \beta)] a_i. \quad (21)$$

где M - момент внешних нагрузок относительно опоры 1.

При определении коэффициентов матриц податливости и влияния на последнем этапе верхняя балка рассматривается как однопролетная с консолью с наложенной связью 8 в месте установки домкрата при использовании дополнительного уравнения, смысл которого - усилие в наложенной связи равно нулю:

$$R_2 = (M - \sum_{i=6}^8 D_i a_i) / a_2 = 0. \quad (22)$$

При расчетах конструктивных систем с поршневыми домкратами с одинаковыми площадями поршней уравнения (15)-(18) существенно упрощаются

$$D^{(k)} = p^{(k)} F; \begin{bmatrix} h_6^{(k)} \\ h_7^{(k)} \\ h_8^{(k)} \end{bmatrix} = D^{(k)} \begin{bmatrix} \delta_{s6}^{(k)} \\ \delta_{s7}^{(k)} \\ \delta_{s8}^{(k)} \end{bmatrix}; \quad (15a, 16a)$$

$$\begin{bmatrix} R_1^{(k)} \\ \vdots \\ R_5^{(k)} \end{bmatrix} = D^{(k)} \begin{bmatrix} r_{s6}^{(k)} \\ \vdots \\ r_{s8}^{(k)} \end{bmatrix}; p_s^{(k)} = R_1^{(k)} / r_{s6}^{(k)} F, \quad (17a, 18a)$$

где $\delta_{s6}^{(k)}$ - перемещение, включающее $\delta_{s6}^{(uk)}$ и $\delta_{s6}^{(vk)}$ (перемещения верхней и нижней подсистем от групповых единичных нагрузок от домкратов на k -ом этапе; $r_{s6}^{(k)} = r_{s6}^{(uk)} + r_{s6}^{(vk)}$ - то же усилие.

На конечном этапе при повороте балки вокруг опоры 1 давление жидкости и усилия в поршневых домкратах в отличие от плоских сохраняют постоянные численные значения:

$$p^{(5)} = M / F \sum_{i=6}^8 a_i. \quad (23)$$

Уравнения (15a-18a) и (23) применимы и для конструктивных систем с плоскими домкратами, если число домкратов в каждом пакете пропорционально величинам раскрытия стыков в местах установки пакетов.

Представленный пример формирования матричных уравнений является иллюстрацией к построению математической модели расчета системы «основание - фундамент-домкраты-верхнее строение», состоящей из двух подсистем (суперэлементов), соединенных односторонними связями и воспринимающие усилия от домкратов. Верхняя балка может рассматриваться как суперэлемент, включающий стержни, пластины и другие элементы, а нижняя - различные виды фундаментов на упругом основании (фундаментные плиты и балки, балочные ростверки и др.). Вычисляемые усилия и перемещения в горизонтальном шве выравниваемого здания от управляемых воздействий домкратов являются дополнительными исходными данными для расчетов напряженно-деформированных состояний указанных подсистем (суперэлементов) по известным программным комплексам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шумовский В.П. К вопросу об автоматической компенсации неравномерных осадок зданий / Шумовский В.П. // Строительные конструкции. - Вып. XXIII. - К.: Будівельник, 1974. - С.56-59.
2. Шумовский В.П. Методические рекомендации по применению плоских домкратов в строительстве / В.П. Шумовский, О.К. Богданов - К.: НИИСК Госстроя СССР, 1979. - 27 с.
3. Болотов Ю.К. О проектировании бескаркасных зданий на просадочных грунтах, приспособленных к выравниванию зданий / Болотов Ю.К., Шумовский В.П. // Проблемы защиты строительства зданий и сооружений на просадочных грунтах. - К.: НИИСК, 1987. - С.115-117.
4. Автоматизированная система подъема сооружений «Атлант» / [Болотов Ю.К., Зотов М.В., Зотов М.В., Панасюк Л.Н. и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. - М.: Новые технологии. - 2003. - №3. - С. 38-41.
5. Клепиков С.Н. О расчете многоэтажных зданий, выравниваемых домкратными системами / Клепиков С.Н., Хорунжий В.И. // Строительство и архитектура. - 1982. - №3 - С. 17-18.
6. Хорунжий В.И. Расчет перемещений конструкций и контактных усилий при выравнивании зданий домкратными системами // Эффективные конструкции гражданских зданий. - КиевЗНИИЭП. - 1983. - С. 37-40.