

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОТЯЖЕННЫХ КРУПНОПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ НА СИЛОВЫЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

И.Э. БУАДЗЕ, *инж.* \*

И.Ш. ГАГНИДЗЕ, *канд. техн. наук* \*\*

В.С. КСЕНИДИ, *инж.* \*\*

*\*Технический университет Грузии*

*\*\*ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет»*

*В статье излагаются результаты разработанной методики расчета крупнопанельных зданий с частичным или полным подключением в работе междуэтажных перекрытий.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: жесткостная характеристика, крупнопанельное здание.

В протяженных крупнопанельных зданиях несущими могут быть как продольные, так и поперечные стены. В зданиях, где несущими являются продольные стены, междуэтажные перекрытия бывают сборными, с плохо заполненными швами или монолитными, имеющими частую разрезку поперечными швами. Такие перекрытия в продольном направлении работают фрагментарно на растяжение-сжатие и их сдвиговая жесткость или отсутствует, или имеет незначительную величину.

В таких случаях, при расчете поперечное сечение крупнопанельного здания делится на отдельные, сборные, плоские вертикальные пластинки-диафрагмы или на горизонтальные плоские пластинки и их отдельные элементы. Число вертикальных пластинок равно числу продольных наружных и внутренних стен. Они заделаны в фундаменты. При такой конструкции поперечного сечения совместная работа продольных стен исключается из-за отсутствия целостной работы междуэтажного перекрытия. Такие здания могут рассчитываться в плоской постановке. Однако, бывают исключения, когда расчетное сечение таких вертикальных пластинок включает так же сечения участков плит перекрытия, которые, вследствие их взаимной заделки со стенами, реально работают совместно с ними на растяжение-сжатие и на сдвиг. Можно сказать, что в количественном отношении степень этой заделки очень трудно оценить, хотя рекомендации по их расчету в нормативных документах имеются [1].

Продольные стены (наружные или внутренние) имеют отверстия, и они соединены между собой продольными и поперечными швами. Эти швы расположены на расстоянии длины и высоты наружных и внутренних продольных стен (панелей). В настоящее время точный расчет таких сооружений, какими являются крупнопанельные здания, с учетом всех физических, геометрических и конструктивных особенностей, практически невозможно. В связи с этим при их расчете используются разные приближенные методы расчета, когда действительный объект заменяется эквивалентной, более упрощенной моделью. Эквивалентность оригинала и копии заключается в максимальном учете вышеприведенных особенностей. В данном случае пространственная работа здания заменяется изучением работы вертикальных пластинок (стен) с учетом работы междуэтажного перекрытия. При этом здесь так же применяется упрощенная методика расчета и ее суть раскрывается ниже.

При составлении расчетной схемы продольной стены учитываются ее разные конструктивные особенности. В частности податливость соединения ука-

занных швов по ранее указанной методике [2, 3, 4]. Замена стеновой панели с отверстием на эквивалентную сплошную панель с приведенными жесткостными и иными характеристиками на разные силовые воздействия. В продольном направлении работа панели на растяжение-сжатие заменяется специальными стрингерами или совокупностью стрингеров. В зависимости от реальной связи, одиночные стрингеры располагаются на разных уровнях по высоте стены и чаще всего они ставятся на уровне междуэтажных перекрытий.

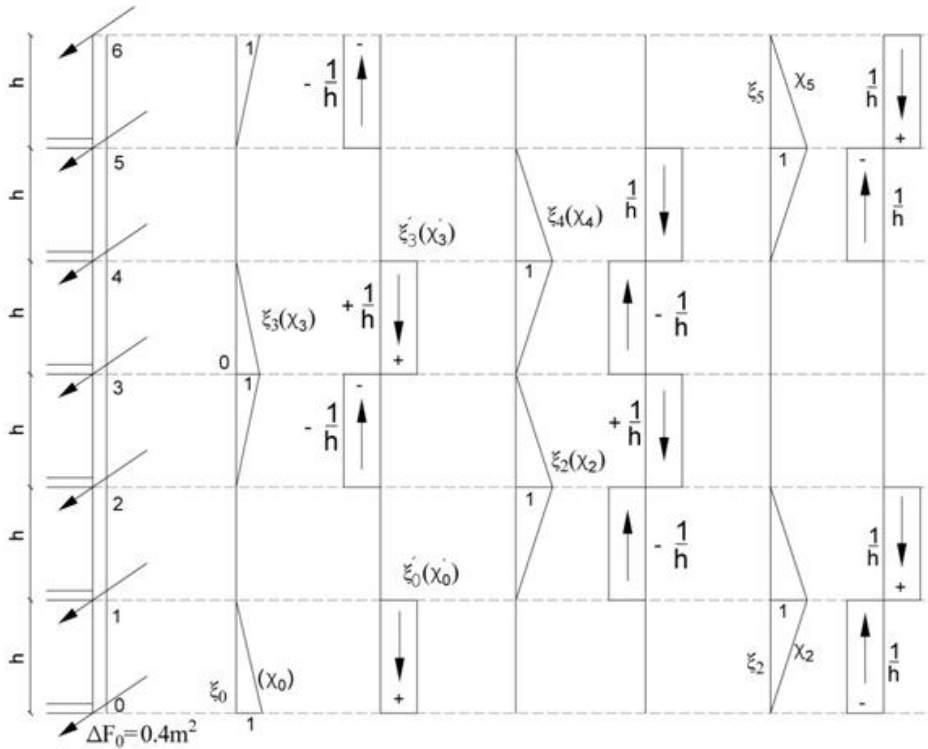


Рис. 1 Расположение стрингеров и характер распределения единичных перемещений

Таким образом, совокупность стрингеров, работающих только на растяжение-сжатие, и промежутки сечения между ними с приведенными жесткостными характеристиками заменяют реальное поперечное сечение и образуют расчетную схему крупнопанельного здания. При расположении всех стрингеров только в вертикальной плоскости получается частный вариант – плоская расчетная схема бескаркасного здания (рис. 1). При расчете указанных зданий на температуру за искомые неизвестные принимаются перемещения тех точек, где расположены стрингеры. В данной работе приняты следующие обозначения:  $U_i$  – продольные перемещения, а  $W_j$  – поперечные вертикальные перемещения. Эти перемещения представляются в виде произведения двух функций. Первая функция является искомой, а вторая соблюдает все граничные условия задачи, и они выбираются предварительно [2]. Одним словом, поставленная задача решается в плоской постановке (не учитываются горизонтальные перемещения из плоскости) с учетом продольных  $U_i$  и вертикальных перемещений  $W_j$ .

На основе вышеизложенного получается:

$$u(xz) = \sum_{i=1}^m U_i(x) \xi_i(z) \quad (i = 1, 2, 3 \dots m) \quad (1)$$

$$w(xz) = \sum_{j=1}^n W_j(x) \chi_j(z) \quad (j = 1, 2, 3 \dots n)$$

Свободные члены от температуры определяются в виде работы температурных усилий, возникающих в сечениях здания, на возможных перемещениях  $\xi_i(z)$  и  $\chi_j(z)$ . В разложениях (1) функции  $U_i$  и  $W_j(x)$  зависящие от  $x$ , являются искомыми, а функции  $\xi_i(z)$  и  $\chi_j(z)$  зависящие от  $z$ , выбираются предварительно.

Система дифференциальных уравнений, описывающая напряженно-деформированное состояние рассматриваемого типа здания составляется на основе общей системы уравнений табл. 1[4]. В матричной форме она имеет следующий вид:

$$\bar{\Omega} \bar{X} = \bar{P}, \quad (2)$$

где 
$$\bar{\Omega} = \begin{vmatrix} A_{ij} & B_{ij} \\ -B_{ji} & B_{ji} \end{vmatrix}; \quad \bar{X} = \begin{vmatrix} U_i \\ W_j \end{vmatrix}; \quad \bar{P} = \begin{vmatrix} P_{ix} \\ P_{iz} \end{vmatrix}; \quad (3)$$

здесь

$$A_{ij} = C_1 U_i'' a_{ij} - C_2 U_i a_{ij}'^z; \quad B_{ij} = C_2 W_j'' d_{ij} - C_1 W_j d_{ij}'^z; \quad B_{ji} = \nu C_1 W_j' \Gamma_{ij} - C_2 W_j \bar{\Gamma}_{ji};$$

$$C_1 = \frac{E}{1-\nu^2}; \quad C_2 = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (4)$$

Отдельные коэффициенты определяются по следующим формулам:

$$a_{ij} = \int \xi_i(z) \xi_j(z) \delta dz; \quad \Gamma_{ij} = \int \xi_i'(z) \chi_j(z) \delta dz;$$

$$a_{ij}'^z = \int \xi_i'(z) \xi_j'(z) \delta dz; \quad \bar{\Gamma}_{ij} = \int \chi_j'(z) \xi_i(z) \delta dz; \quad (5)$$

$$d_{ij} = \int \chi_i(z) \chi_j(z) \delta dz; \quad d_{ij}'^z = \int \chi_i'(z) \chi_j'(z) \delta dz.$$

где  $\Omega$  – матрица коэффициентов уравнений,  $\bar{X}$  – матрица-столбец, вектор неизвестных перемещений,  $\bar{P}$  – матрица-столбец, вектор свободных членов,  $\delta_i$  – приведенная толщина стен,  $z$  – поперечная (по высоте) координата точки.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (2) выражает равенство нулю суммы работ внешних и внутренних сил на предварительно выбранных перемещениях. Коэффициенты  $A_{ij}$ ,  $B_{ij}$ ,  $B_{ji}$  – выражают работу внутренних сил на предварительно выбранных перемещениях  $\xi_i(z)$ ,  $\chi_j(z)$  при  $U_i = 1$ ;  $W_j = 1$ . Эти коэффициенты определяются из формул (4,5).

Эпюры единичных функций и их производных приводятся на рис. 2

Для свободно опертого протяженного здания граничные условия на торцах будут удовлетворены, в случае разложения продольных  $u_i(x)$  и вертикальных  $w_j(x)$  перемещений в тригонометрические ряды:

$$u_i(x) = \sum_{i=1}^m \frac{U_i \cos n\pi x}{l}; \quad w_j(x) = \sum_{i=1}^n \frac{W_j \sin n\pi x}{l}. \quad (6)$$

Здесь  $n$  – номер числа ряда,  $l$  – длина здания.

Указанное опирание здания предполагает его опирание на торцах на жесткие в своей плоскости и гибкие из плоскости диафрагмы. При выборе начала

координатной системы на одной из опор здания, граничные условия на краях здания примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0 \text{ имеем } & \sigma_i(0) = 0; \quad w_j(0) = 0; \\ \text{при } x = l \text{ имеем } & \sigma_i(l) = 0; \quad w_j(l) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) следует, что торцевые сечения здания должны быть свободными от продольных нормальных напряжений, а поперечные (вертикальные) перемещения должны отсутствовать. В зависимости от вида внешней нагрузки, она так же будет разложена в тригонометрический ряд:

$$p_{ix}(x) = \frac{4}{\pi} q_{ix}^0 \cos \frac{m\pi x}{l}, \quad p_{iz}(x) = \frac{4}{l} q_{iz}^0 \sin \frac{m\pi x}{l}. \quad (8)$$

Здесь:  $q_{ix}^0$  – продольная температурная нагрузка,  $q_{iz}^0$  – температурная нагрузка вертикального направления.

Все полученные выражения по перемещениям и внешним нагрузкам, с учетом их разложения в тригонометрические ряды, подставляются в систему дифференциальных уравнений (2). Полученная система упрощается, сокращается на тригонометрические функции  $\cos(\pi x/l)$  и  $\sin(\pi x/l)$  и делится на коэффициент  $G$  (модуль сдвига). Полученная окончательная система алгебраических уравнений решается относительно искомых неизвестных перемещений  $U_i$  и  $W_j$ . Для решения системы алгебраических уравнений существуют разные стандартные программы, основанные на разных приближенных методах решения системы.

Для среднего поперечного сечения здания продольные нормальные напряжения в стрингерах определяются по формуле:

$$\sigma_i = -\frac{m\pi}{l} E U_i \xi_i(z). \quad (9)$$

По длине стены нормальные напряжения меняются по закону  $\sin(\pi x/l)$ , где  $x$  – координата точки, меняющаяся по длине здания, а  $l$  – длина здания.

Нормальные усилия в стрингерах определяются по формуле:

$$N_i = \sigma_i \Delta F_i \quad (10)$$

Здесь  $\Delta F_i$  - приведенная площадь произвольного стрингера.

Правильность полученных результатов устанавливается следующим образом. Необходимо проектировать все усилия на продольную ось и их сумма должна быть равна нулю.

В среднем сечении зданий сдвигающие усилия отсутствуют, поэтому рассматриваются только нормальные усилия. Сдвигающие усилия  $S_x$  в опорном сечении рядом с крайним стрингером ( $k - 1$ ) определяются по формуле:

$$S_k = S_{k-1} - \frac{\pi}{l} \Delta F_k \sigma_k. \quad (11)$$

Здесь:  $\sigma_k$  – нормальные напряжения в рассматриваемом стрингере,  $S_{k-1}$  – сдвигающие усилия с нижней стороны рассматриваемого стрингера  $\Delta F_k$ ,  $S_k$  – сдвигающие усилия сверху рассматриваемого стрингера.

При использовании этой формулы требуется знание сдвигающего усилия  $S_{k-1}$ , которое или известная конкретная величина, или равно нулю.

Суммарные сдвигающие усилия  $T_k$  в опорном сечении между соседними стрингерами стены определяются по формуле:

$$T_k = S_k h_k. \quad (12)$$

Здесь  $S_k$  – сдвигающее усилие в стрингере с номером “ $k$ ”,  $h_k$  – высота стены или расстояние между стрингерами по высоте сечения.

При наличии вертикальной нагрузки проверка правильности выполненных вычислений по сдвигающим усилиям происходит следующим образом: в опорных сечениях зданий вертикальные составляющие сдвигающих сил должны уравновешивать всю вертикальную внешнюю нагрузку.

С учетом разложения в тригонометрический ряд, суммарная вертикальная внешняя нагрузка определяется по формуле:

$$\frac{4}{\pi} \sum_{i=1}^m q_{iz} \frac{2l}{\pi}. \quad (13)$$

Здесь  $q_{iz}$  – внешняя вертикальная нагрузка.

*Пример.* Для иллюстрации разработанной методики расчета и для оценки влияния обжатия продольных стен по высоте крупнопанельного здания ниже приводится пример его расчета на воздействие температуры. Как было сказано выше, расчет здания производится в перемещениях, в плоской постановке.

Расчетная схема зданий, с учетом изображения единичных, предварительно заданных перемещений, приводится на рис. 1, 2, 3. Там же приводится эпюра распределений температурных воздействий на элементы здания, где принято, что температуре  $t$  подвергаются все стрингеры, кроме нулевого. Влияние междэтажного перекрытия учитывается при определении площадей стрингеров

Таким образом, с учетом вышеизложенного, фактически рассчитывается наружная продольная стена здания как балка-стенка, опирающаяся на концах на жесткие в своей плоскости и гибкие из плоскости опорные диафрагмы. Коэффициент Пуассона материала принимается равным нулю. Пролет здания  $l = 2730,0$  см. Высота  $H = 1680,0$  см. Приведенные площади стрингеров (Рис.2.) равны:  $\Delta F_0 = 0,4 м^2$ ,  $\Delta F_1 = \Delta F_2 = \Delta F_3 = \Delta F_4 = \Delta F_5 = 0,38 м^2$

В общем виде значения коэффициентов (5) имеет следующий вид:

*коэффициенты первого квадранта:*

$$a_{00} = \int_0^2 \xi_0^2 \delta ds = F_0, \quad a_{11} = a_{22} = a_{32} = a_{44} = a_{55} = \Delta F_i,$$

$$a'_{00} = a'_{66} = \int \xi_0' \xi_0' \delta ds = \delta / h, \quad a'_{11} = a'_{22} = a'_{32} = a'_{44} = a'_{55} = 2\delta / p,$$

$$a'_{01} = a_{10} = a_{12} = a_{21} = a_{23} = a_{32} = a_{34} = a_{42} = a_{45} = a_{54} = a_{56} = a_{65} = -\delta / h,$$

*коэффициенты II-го, III-го и IV-го квадрантов:*

$$\Gamma_{00} = \int \xi_0' \chi_0 \delta ds = \frac{\delta}{2}, \quad \Gamma_{01} = \int \xi_0' \chi_1 \delta ds = \frac{\delta}{2}, \quad \Gamma_{66} = \int \xi_{66}' \chi_6 \delta ds = \frac{\delta}{h},$$

$$\Gamma_{01} = \Gamma_{12} = \Gamma_{23} = \Gamma_{34} = \Gamma_{45} = \Gamma_{56} = \delta / 2,$$

$$\Gamma_{10} = \Gamma_{21} = \Gamma_{32} = \Gamma_{43} = \Gamma_{54} = \Gamma_{65} = -\delta / 2, \quad \Gamma_{11} = \Gamma_{22} = \Gamma_{33} = \Gamma_{44} = \Gamma_{55} = 0,$$

$$d_{00} = \int \chi_0 \chi_0 \delta ds = \delta h / 3, \quad d_{66} = \int \chi_6 \chi_6 \delta ds = \delta h / 3, \quad d_{11} = \int \chi_1 \chi_1 \delta ds = 2\delta h / 3,$$

$$d_{22} = d_{33} = d_{44} = d_{55} = d_{11} = 2\delta h / 3,$$

$$d_{10} = d_{01} = d_{21} = d_{12} = d_{32} = d_{23} = d_{43} = d_{34} = d_{54} = d_{45} = d_{65} = d_{56} = \delta h / 6,$$

$$d'_{00} = \int \chi_0' \chi_0' \delta ds = \delta / h, \quad d'_{66} = \delta / h; \quad d'_{11} = d'_{22} = d'_{33} = d'_{44} = d'_{55} = 2\delta / 6;$$

$$d'_{01} = d'_{10} = d'_{12} = d'_{21} = d'_{23} = d'_{32} = d'_{43} = d'_{34} = d'_{54} = d'_{45} = d'_{65} = d'_{56} = \delta / h.$$

После подстановки численных значений приведенных коэффициентов в систему уравнений (3) получается система алгебраических уравнений. При на-

личии семи стрингеров порядок алгебраических уравнений получается  $n = 14$  (берется продольное и вертикальное перемещение точек расположения стрингеров). Ниже приводятся величины продольных  $U_i$  и вертикальных перемещений  $W_j$  для точек, где расположены стрингеры. Прогибы даются для среднего поперечного сечения-балки стенки:

$$\begin{aligned} U_0 &= -0.005767t \text{ см}; & W_6 &= -0.0046232t \text{ см}; \\ U_1 &= -0.0084582t \text{ см}; & W_5 &= -464.74 \cdot 10^{-4}t \text{ см}; \\ U_2 &= -0.0103884t \text{ см}; & W_4 &= -472.92 \cdot 10^{-4}t \text{ см}; \\ U_3 &= -0.0118272t \text{ см}; & W_3 &= -4874 \cdot 10^{-4}t \text{ см}; \\ U_4 &= -0.0129968t \text{ см}; & W_2 &= -5063.8 \cdot 10^{-4}t \text{ см}; \\ U_5 &= -0.014087t \text{ см}; & W_1 &= -5242.4 \cdot 10^{-4}t \text{ см}; \\ U_6 &= -0.0152806t \text{ см}; & W_0 &= -5323.4 \cdot 10^{-4}t \text{ см}; \end{aligned}$$

Опираясь на полученные данные, можно констатировать, что учет обжатия при расчете существенно влияет на картину напряженно-деформированного состояния здания при температурных воздействиях. Кроме этого, изменение жесткостных характеристик элементов здания может повлиять не только количественно, но и качественно, на указанные показатели [5].

#### Л и т е р а т у р а

1. Рекомендации по расчету зданий на температурно-влажностные воздействия. – ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР, Москва, 1983 г.
2. Васильков Б.С. Расчет складчатых систем и оболочек// *Инженерный журнал*. – 1961. – № 4. – С. 123-131.
3. Васильков Б.С, Гагнидзе И.Ш. К расчету крупнопанельных зданий на температурные воздействия// *ЦНИИСК им. Кучеренко. Строительные конструкции*. – 1970. – Вып. 8. – С. 123-128.
4. Гагнидзе И.Ш. Исследование работы многосвязных складчатых систем и оболочек. – Дисс. канд. техн. наук, 1972 г.
5. Pimenta P.M., Wriggers P. New Trends in Thin Structures: Formulation, Optimization and Coupled Problems// *CISM International Centre for Mechanical Sciences*. – 2010. – Vol. 519, 228 p.

#### References

1. Recommendations on Analysis of Buildings subjected to Temperature-and- Moisture Actions. TzNIISK im. Kucherenko Gosstroya SSSR, Moscow. 1983.
2. Vasil'kov BS. (1961). Analysis of hipped plate structures and shells. *Ingenery Jurnal*. No 4, 123-128.
3. Vasil'kov BS, Gagnidze I.Sh. (1970). On analysis of large-panel buildings subjected to temperature actions. *TzNIISK im. Kucherenko. Stroit. Konstruktzii*, Iss. 8, p. 123-128.
4. Gagnidze I.Sh. (1972). Issledovanie raboti mnogosvjaznih skladchatih sistem i obolochek. Diss. kand. tehn. naul.
5. Pimenta PM, Wriggers P. (2010). New Trends in Thin Structures: Formulation, Optimization and Coupled Problems. *CISM International Centre for Mechanical Sciences*. Vol. 519, 228 p.

#### METHOD OF CALCULATION OF EXTENDED LARGE-PANEL BUILDINGS SUBJECTED TO FORCE AND TEMPERATURE ACTION

\*Buadze I.E., \*\*Gagnidze I.Sh., \*\*Ksenidi B.S.

\**Technical University of Georgia, Tbilisi*; \**Moskovskiy Gos. Stroit. Universitet, Moscow*

This paper presents the results of the developed method of calculation of large-panel extended buildings subjected to the temperature action with taking into account inserted floors.

KEYWORDS: stiffness characteristics, large-panel building, temperature analysis.