

РАСЧЕТ МОНОЛИТНЫХ ЗДАНИЙ НА ДЕЙСТВИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ НАГРУЗКЕ ПО ТРЕБОВАНИЯМ МОЛДАВСКИХ НОРМ

*Докт. техн. наук Золотков А.С. (Заместитель министра,
Министерство Регионального Развития и Строительства, Республика
Молдова)*

*Dr. Zolotcov A.S. (Deputy Minister, Ministry of Regional Development and
Construction, Republic of Moldova)*

Аннотация

Результаты выполненных научных исследований послужили основанием для разработки нового научного направления в области сейсмостойкого проектирования строительных конструкций по расчету прочности монолитных стен при разрушении по наклонным сечениям. Разработанный аналитический метод расчета, а также динамическая модель, основанная на классической обобщенной расчетной модели стены, которая довольно близко воспроизводит её физический оригинал, позволит получить повышенную безопасность зданий и сооружений на сейсмические воздействия.

Annotation

The results of the completed scientific research fundamentally contributed to the development of a new scientific direction in the area of seismic resistant design of building construction by calculation of monolithic walls resistance in oblique sections actions. The developed analytical method of calculation, as well as the dynamic model, based on the classic generalized calculated wall model, which reproduces fairly accurately its physical original, will allow increasing the safety of buildings and constructions with regards to seismic influence.

В мировой практике проектирования монолитных зданий применяются различные методы расчета стен зданий на действие поперечной нагрузке с учетом сейсмического воздействия. Большинство из них сугубо приближенные, основанные на рассмотрении существенно идеализированных расчетных моделей стен. Это обусловило необходимость проведения разносторонних исследований поведения монолитных зданий в различных силовых ситуациях при действии статических и вибродинамических нагрузок.

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований была разработана расчетная модель (рис. 1), учитывающая одновременное действие в расчетном наклонном сечении изгибающих моментов, поперечных и нормальных усилий, а также влияние технологических особенностей возведения монолитных зданий таких как раздельное бетонирование стен и устройство технологических швов.

Условие прочности по i -ому расчетному наклонному сечению (см. рис. 1) можно записать в виде системы уравнений:

$$N_i = N_b + N'_s - N_s + N_t - N_{sq} - T_{s.inc} \cdot \text{Cos}\gamma; \quad (1)$$

$$Q_i = Q_b + Q_t + Q_{sw} + T_{s.inc} \cdot \text{Sin}\gamma; \quad (2)$$

$$M_{i(o)} =$$

$$Q_i Z_Q = N_b Z_b + N'_s Z'_s + N_t Z_t + Q_t Z_{qt} - N_{sq} Z_{sq} + Q_{sw} Z_{sw} + T_{s.inc} Z_{s.inc} - N_i Z_N \quad (3)$$

В уравнениях (1) ... (3):

N_i - равнодействующая вертикальной нагрузки для i -го расчетного сечения;

Q_i - перерезывающая сила от внешней горизонтальной нагрузки в i -ом сечении;

$M_{i(o)}$ - сумма моментов относительно точки O горизонтальных сил S_k ;

$$M_{i(o)} = \sum_{k=i+1}^n S_k h_k \quad (4)$$

Величину $M_{i(o)}$ иначе можно определять как момент равнодействующей горизонтальных сил S_k относительно точки O , находящейся на пересечении i -го сечения с линией действия усилия N_s .

$$M_{i(o)} = Z_Q Q_i \quad (5)$$

$$Z_Q = \frac{\sum_{k=i+1}^n S_k h_k}{\sum_{k=i+1}^n S_k} \quad (6)$$

N_s, N'_s - равнодействующая напряжений соответственно в растянутой и сжатой контурной арматуре в расчетном сечении;

$N_{sq}, Q_{sw}, T_{s.inc}$ - равнодействующая напряжений соответственно в вертикальных и наклонных полевых стержнях, пересекаемых расчетным сечением;

N_t - равнодействующая напряжений σ_y на горизонтальном участке расчетного наклонного сечения;

Q_t - равнодействующая сил трения на горизонтальном участке расчетного наклонного сечения;

Q_b - сопротивление сжатой зоны бетона срезу;

N_b - равнодействующая напряжений σ_γ в сжатой зоне стены;

Ошибка! Закладка не определена. x - длина сжатой зоны стены;

$Z_b, Z_s', Z_N, Z_t, Z_{qt}, Z_{sq}, Z_{sw}, Z_{s.inc}$ - плечи соответствующих сил относительно точки O .

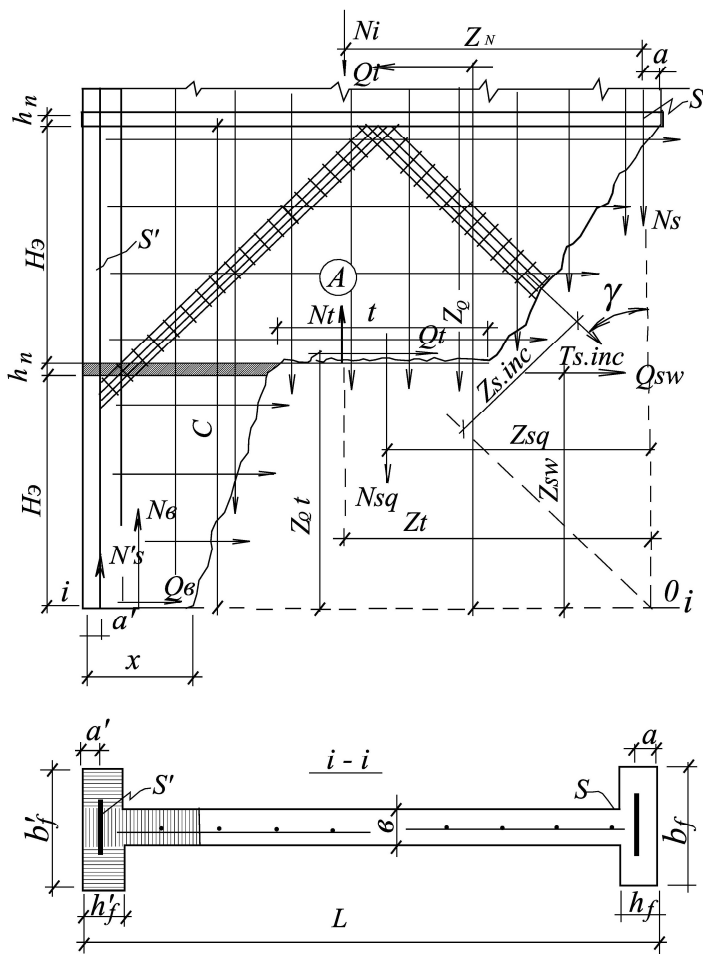


Рис. 1. Расчетная схема для расчета прочности монолитных стен при разрушении по наклонным сечениям.

Определим значения усилий, входящих в уравнения (1)...(3) для двух случаев работы стены: $x \leq h'_f$ и $x > h'_f$.

После определения значений усилий в бетоне и арматуре и поставив их в выражения (1)...(3), получим систему уравнений для i -го расчетного наклонного сечения стены.

а) при $x \leq h'_f$

В формуле (1) определяем:

$$N_b = 0,5\omega_1 R_b b'_f x, \quad (7)$$

где $\omega_1 = 0,95$ - коэффициент полноты эпюры напряжений σ_y .

$$N'_s = nR_b A'_s \frac{x-a'}{x}; \quad (8)$$

$$N_s = \psi_s R_s A_s; \quad (9)$$

$$N_{sq} = q_{sq}(L - h_f - x - t - S_q); \quad (10)$$

$$T_{s,inc} = \sum A_{s,inc} R_{s,inc}; \quad (11)$$

Тогда с учетом формул (7)...(11) и соответствующих преобразований уравнение (1) принимает вид:

$$N_i = R_b \left(0,47b'_f x + nA'_s \frac{x-a'}{x} \right) - \psi_s R_s A_s + N_t - q_{sq}(L - h_f - x - t - S_q) - A_{s,inc} R_{s,inc} \cos \gamma; \quad (12)$$

В формуле (2) определяем:

$$Q_b = 0,74R_{bsh} [b + 0,7(b'_f - b)]x; \quad (13)$$

$$Q_t = fN_t; \quad (14)$$

$$Q_{sw} = q_{sw}(c - S_w). \quad (15)$$

Тогда с учетом формул (13)...(15) и соответствующих преобразований уравнение (2) принимает вид:

$$Q_i = 0,74R_{bsh} [b + 0,7(b'_f - b)]x + fN_t + q_{sw}(c - S_w) + A_{s,inc} \cdot R_{s,inc} \sin \gamma; \quad (16)$$

$$M_{i(o)} = R_b \left[0,47b'_f x \left(L - a - \frac{x}{3} \right) + nA'_s \frac{x-a'}{x} (L - a - a') \right] + N_t \left\{ \frac{2}{3} [L - (H_e + h_p)tg\beta + +0,5H_e tga - x] - a + f(H_e + h_p) \right\} - 0,5q_{sq}(L - h_f - t - x - S_q)(L - a - x - -S_q) + 0,5q_{sq}(c - S_w)^2 - A_{s,inc} \cdot R_{s,inc} \cdot Z_{s,inc} - N_i Z_N; \quad (17)$$

б) при $x > h'_f$

$$N_b = 0,5\omega_1 R_b \left[bx + \frac{2x-h'_f}{x} (b'_f - b)h'_f \right]; \quad (18)$$

$$N_i = R_b \left\{ 0,47 \left[bx + \frac{2x-h_f'}{x} (b_f' - b) h_f' \right] + nA_s' \frac{x-a'}{x} \right\} - \psi_s R_s A_s + N_t - q_{sq} (L - h_f - t - x - S_q) - A_{s,inc} R_{s,inc} \text{Cosy}; \quad (19)$$

$$Q_b = 0,74 R_{bsh} \left[bx + \left(1,04 - 0,44 \frac{h_f'}{x} \right) (b_f' - b) \frac{h_f'^2}{x} \right]; \quad (20)$$

$$Q_i = 0,74 R_{bsh} \left[bx + \left(1,04 - 0,44 \frac{h_f'}{x} \right) (b_f' - b) \frac{h_f'^2}{x} \right] + f N_t + q_{sw} (c - S_w) + A_{s,inc} \cdot R_{s,inc} \text{Siny}; \quad (21)$$

$$M_{i(o)} = R_b \left\{ 0,47 \left[bx \left(L - a - \frac{x}{3} \right) + \frac{2x-h_f'}{x} (b_f' - b) h_f' \left(L - a - \frac{h_f'}{3} \cdot \frac{3x-2h_f'}{2x-h_f'} \right) \right] + nA_s' \frac{x-a'}{x} (L - a - a') \right\} + N_t \left\{ \frac{2}{3} [L - (H_e + h_p)] \text{tg} \beta + 0,5 H_e \text{tg} \alpha - x \right\} - a + f (H_e + h_p) \left\} - 0,5 q_{sq} (L - h_f - t - x - S_q) \cdot (L - a - x - S_q) + 0,5 q_{sw} (c - S_w)^2 - A_{s,inc} \cdot R_{s,inc} \cdot Z_{s,inc} - N_i Z_N. \quad (22)$$

Для апробирования изложенного выше расчета прочности стен монолитных зданий была рассчитана стена без полевого армирования, подвергнутого виброиспытаниям до разрушения. Эта стена разрушилась при $Q = 870 \text{ kN}$.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

$N_i = 3060 \text{ kN}$ – нагрузка от внешних воздействия (постоянных, короткого и длительного воздействий).

$$\begin{aligned} H_e &= 264 \text{ cm}; & L &= 640 \text{ cm}; & h_p &= 16 \text{ cm}; \\ h_f &= h_f' = 20 \text{ cm}; & b &= h_f' = 20 \text{ cm}; & b_f &= b_f' = 60 \text{ cm}; \\ a &= a' = 24 \text{ cm}; & h_0 &= L - a = 640 - 24 = 616 \text{ cm}; \\ c &= H_e + h_p + H_e = 264 + 16 + 264 = 544 \text{ cm}; \end{aligned}$$

$$\text{tg} \alpha = 16,2 \quad \beta_p = 16,2 \frac{L}{H_e - h_p} = 16,2 \frac{640}{264 - 16} = \text{tg} 30^\circ = 0,577$$

$$\text{tg} \beta = 9,6 \quad \beta_p = 9,6 \frac{L}{H_e - h_p} = 9,6 \frac{640}{264 - 16} = \text{tg} 22^\circ = 0,40$$

Бетон класса В20

$$R_b = 11,7 \text{ МПа} \left(117 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right);$$

$$R_{bt} = 0,918 \text{ МПа} \left(9,18 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right);$$

$$R_{bsh} = \sqrt{0,5 R_b R_{bt}} = \sqrt{0,5 * 117 * 9,18} = 23,17 \text{ kg/cm}^2;$$

$$E_b = 27500 \text{ МПа} \left(275000 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right).$$

Контурная арматура класса А-III

$$R_s = 285 \text{ МПа} \left(3600 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right);$$

$$R_{sc} = 355 \text{ МПа} \left(3600 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right);$$

$$E_s = 180000 \text{ МПа} \left(1800000 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right); \quad n = E_s/E_b = 180000/$$

$$27500 = 6,55;$$

$$A_s = A'_s = 27,4 \text{ см}^2; \quad A_{sq} = 0; \quad A_{sw} = 0;$$

$$A_{s.inc} = 0;$$

$$\psi_s = 0,4.$$

Схема приложения инерционных сил дана на рис. 2.

ПРИМЕР РАСЧЕТА (при $x > h'_f$)

$$Z_N = 0,5L - a = 0,5 \times 640 - 24 = 296 \text{ см};$$

$$\sum_{k=0}^n S_k = 230,7 + 196,0 + 164,0 + 128,5 + 85 + 21 = 825 \text{ кН}$$

$$M_0 = 2,8 (230,7 \times 6 + 196 \times 5 + 164 \times 4 + 128,5 \times 3 + 85 \times 2 + 21 \times 1) = 10070 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$Z_Q = \frac{10070}{825} = 12,1 \text{ м}.$$

Составим расчетные уравнения (19), (21) и (22):

$$N_i = 117 \left\{ 0,47 \left[20x + \frac{2x - 20}{x} (60 - 20) \cdot 20 \right] + 6,55 \cdot 27,4 \frac{x - 24}{x} \right\} - 0,4 \cdot 3600 \cdot 27,4 + N_t$$

откуда,

$$N_t = 236470 - 1100x + \frac{1383876}{x}.$$

Для стен реальных зданий в формулу (21) можно приближенно

принять $\left(1,04 - 0,44 \frac{h'_f}{x} \right) = 1$, тогда:

$$Q_b = 0,74 R_{bsh} \left[bx + (b'_f - b) \frac{h_f'^2}{x} \right];$$

$$Q_b = 0,74 \cdot 23,17 \left[20x + (60 - 20) \frac{20^2}{x} \right] = 17,15 \left[20x + \frac{16000}{x} \right] = 343x + \frac{274400}{x}$$

$$Q_t = fN_t = 0,7 \left(236470 - 1100x + \frac{1383876}{x} \right) \\ = 165529 - 770x + \frac{968713}{x};$$

$$Q_i = Q_b + Q_t = 343x + \frac{274400}{x} + 165529 - 770x + \frac{968713}{x};$$

$$Q_i = 165529 - 427x + \frac{1243113}{x}.$$

Входящее в формулу (22) выражение $h_f'(3x - 2h_f')/3(2x - h_f')$ может без ощутимого ущерба для точности расчетов заменено на $0,45h_f'$.

$$M_{i(o)} = 117 \left\{ 0,47 \left[20x \left(640 - 24 - \frac{x}{3} \right) + \frac{2x-20}{x} (60 - 20) 20(640 - 24 - 0,45 \cdot 20) \right] + 6,55 \cdot 27,4 \frac{x-24}{x} \cdot (640 - 24 - 24) \right\} + N_t \left\{ \frac{2}{3} [640 - (264 + 16) \cdot 0,4 + + 0,5 \cdot 264 \cdot 0,577 - x] - 24 + 0,7 \cdot (264 + 16) \right\} - 306000 \cdot 296 = 117 \cdot \left\{ 0,47 \left[20x \left(616 - \frac{x}{3} \right) + \frac{2x-20}{x} \cdot 485.600 \right] + 179,5 \frac{x-24}{x} \cdot 592 \right\} + N_t \left\{ \frac{2}{3} [604,16 - x] + 172 \right\} - 90576000;$$

$$M_{i(o)} = 367 \cdot x^2 - 112717x - \frac{36723492}{x} + 110310842.$$

Учитывая уравнение (5) т.е. $M_{i(o)} = Q_i Z_Q$

$$Q_i Z_Q = \left(165529 - 427x + \frac{1243113}{x} \right) \cdot 1210 = 200290090 - 516670x + \frac{1504166730}{x};$$

$$367 \cdot x^2 - 112717x - \frac{36723492}{x} + 110310842 = \\ = 200290090 - 516670x + \frac{1504166730}{x}$$

После необходимых преобразований получим следующее уравнение:

$$x^3 + 1101 \cdot x^2 - 245175x - 4198610 = 0,$$

откуда $x = 203,7$ см. Далее определим $N_t = 188$ кН и $Q_i = 845$ кН, т.е. отклонение от экспериментального значения Q_i (870 кН) составило 3%.

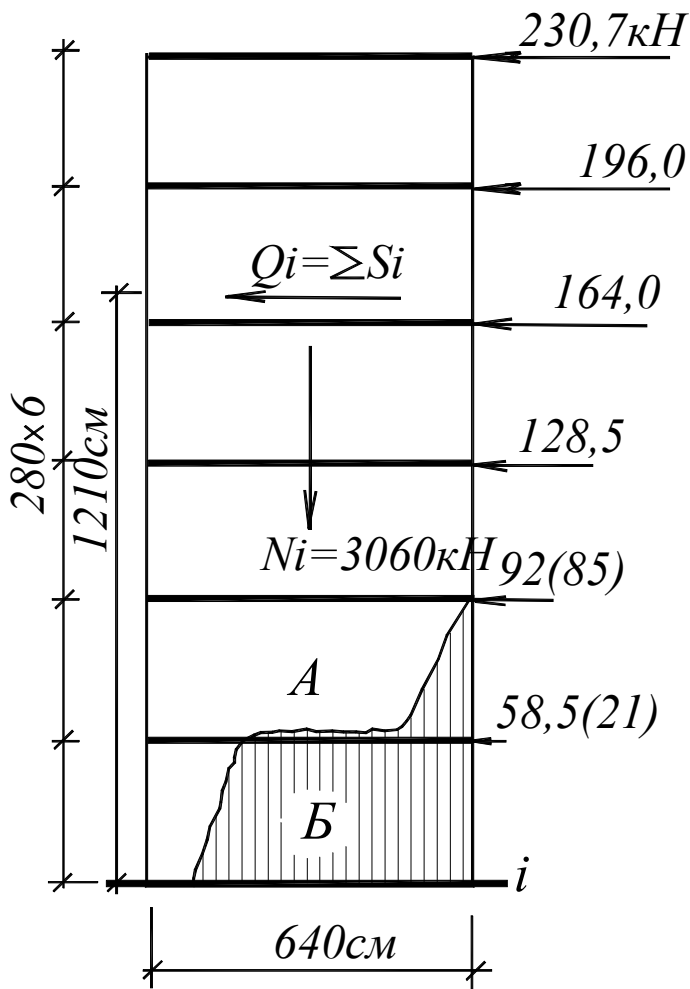


Рис. 2. Схема приложения инерционных сил
 В табл.1 приведены результаты определения несущей способности указанной выше стены различными методами.

Анализ этих данных приводит к выводу, что за исключением методики, изложенной в Республиканских строительных нормах «РСН-13-87. Строительство монолитных зданий в сейсмических районах Молдавской ССР. Часть I.» все остальные методы дают завышенный расчетный прогноз несущей способности железобетонных стен при сейсмическом воздействии.

Что касается методики автора, то она основана на классической обобщенной расчетной модели стены, довольно близко воспроизводящей физический оригинал.

Разработанный аналитический метод расчета, а также динамическая модель, основанная на классической обобщенной расчетной модели включен в молдавских нормах РСН 13-87. «Строительство монолитных зданий в сейсмических районах Молдавской ССР. Республиканские строительные нормы. Часть-I» и «NCM F.02.02.-2006. Calculul, proiectarea și alcătuirea elementelor de construcții din beton armat și beton precomprimat. Chișinău: 2006».

Список литературы:

1. Золотков А. С. Сейсмостойкость монолитных зданий. Издание «Карта Молдовей», 2000.
2. РСН 13-87. Строительство монолитных зданий в сейсмических районах Молдавской ССР. Часть I, Изд. «Тимпул», Кишинев, 1988.
3. Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.
4. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва 1985.