

УДК 699.841  
DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-427-435

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Устойчивость стен индивидуальных жилых домов с деревянным каркасом

С.Ж. Раззаков\*, Б.Г. Жураев, Э.С. Жураев

Наманганский инженерно-строительный институт  
ул. И.А. Каримова, 12, Наманган, Республика Узбекистан, 160103

\*Автор, ответственный за переписку

(поступила в редакцию: 18 февраля 2018 г.; доработана: 22 сентября 2018 г.; принята к публикации: 07 октября 2018 г.)

**Цель.** Исследование устойчивости стен индивидуальных жилых домов с деревянным каркасом и напряженно-деформированного состояния одноэтажного строения, а также рассмотрение проблемы их прочности и сейсмостойкости.

**Методы.** Изложена разработка методики расчета небольших, простых по форме индивидуальных домов с усилением несущих стен каркасом. Методика включает в себя следующие этапы: создание математической модели строений; выбор численного метода – метода конечных элементов (МКЭ), позволяющего учитывать конструктивные особенности строения; проведение расчетов строений на заданные нагрузки. Выбор метода конечных элементов обоснован возможностью производить расчеты пространственной модели, учитывающей реальную геометрию и конструктивные особенности строения.

**Выводы.** Использование пространственной модели позволило детально учесть наличие каркаса, а анализ напряженно-деформированного состояния выявил увеличение жесткости конструкции с каркасом, что свидетельствует о повышении ее прочности, устойчивости, сейсмостойкости. Выявлена связующая роль каркаса, состоящая в объединении элементов конструкции в единую пространственную систему. Статический эффект заключается в восприятии жесткими элементами каркаса приложенной статической нагрузки, вызывающей в них незначительную деформацию, передающуюся на простенки между элементами каркаса. Это приводит к равномерному распределению и общему снижению уровня напряжений в стенах по сравнению с теми же напряжениями в стенах без каркаса.

**Ключевые слова:** индивидуальные жилые дома, стена, деревянный каркас, нагрузка, напряжение, деформирование, прочность, устойчивость, сейсмостойкость

### Введение

На сегодняшний день в мировой практике строительства ведущую роль играют вопросы использования экологически чистых материалов, эффективное использование энергосберегающих технологий и ресурсов, а также вопросы обеспечения сейсмической безопасности индивидуальных жилых домов. В период интенсивного развития современного строительства и активизации сейсмических процессов вопросы сейсмостойкости, обеспечение устойчивости и оценка конструкционной и сейсмической безопасности считаются наиболее актуальными.

В этом направлении достигнуты определенные успехи, особое внимание при проектировании уделяется разработке конструктивных решений, антисейсмических мероприятий, а также совершенствованию методов расчета, обеспечивающих прочность, устойчивость и сейсмостойкость домов. При-

стальное внимание уделяется вопросам совершенствования методов расчета на статические и сейсмические воздействия конструкций индивидуальных жилых домов, возведенных из местных, экологически чистых, малопрочных материалов, определению напряженно-деформированного состояния их конструкции, разработки методов расчета, основанных на выборе пространственных моделей домов, учитывающих их реальную геометрию в реальных условиях работы.

### Цель исследования и постановка задачи

Разработка методики расчета небольших, простых по форме индивидуальных жилых домов с усилением несущих стен каркасом.

Расчетный метод включает в себя следующие этапы:

– создание математической модели строений;

– выбор численного метода, позволяющего учитывать конструктивные особенности и пространственность строения;

– проведение расчетов строений на заданные нагрузки.

Каркас, представляющий собой систему стержневых элементов, должен служить укреплению стен индивидуальных построек. Однако при достаточно большой массе вышележащих конструкций, а также при интенсивном сейсмическом воздействии стойки каркаса могут, изогнувшись, потерять прямолинейную форму, что приведет к выпадению кладки и разрушению строения. Поэтому геометрия и материал стоек каркаса должны быть подобраны таким образом, чтобы предотвратить потерю их устойчивости под действием как вертикальных – от веса вышележащих конструкций (стен, перекрытий), так и горизонтальных нагрузок.

Для определения критической нагрузки, вызывающей потерю устойчивости элемента каркаса, используется энергетический метод, согласно которому при переходе от прямолинейной формы равновесия к криволинейной действующая сила совершает работу, в результате чего увеличивается потенциальная энергия стержня. Уравнение энергетического баланса стержня будет иметь вид

$$U_{изг} = P_{кр} \lambda, \quad (1)$$

где  $U_{изг}$  – потенциальная энергия изгиба;  $P_{кр}$  – критическая величина продольной сжимающей силы;  $\lambda$  – перемещение точки приложения силы;  $P_{кр} \lambda$  – представляет работу этой силы.

Энергия изгиба стержня длиной  $l$  и моментом инерции сечения  $I(x)$  выражается через изгибающий момент  $M_{изг}$  следующим образом:

$$U_{изг} = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{M_{изг}^2}{EI(x)} dx. \quad (2)$$

Учитывая, что  $M_{изг} = EI(x)y''$ , а  $y$  – прогиб стержня, получим

$$U_{изг} = \frac{1}{2} \int_0^l EI(x)(y'')^2 dx. \quad (3)$$

Перемещение  $\lambda$  определяется как разность между начальной длиной стержня  $l$  и проекцией изогнутой упругой линии на прямую, соединяющую опоры, или в приращениях это можно записать как

$$d\lambda = dz - dz \cos \theta, \quad (4)$$

где  $\theta$  – угол наклона касательной в данной точке прогиба.

При малых прогибах, воспользовавшись разложением функции  $\cos \theta$  в степенной ряд

$$\cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \dots + (-1)^n \frac{\theta^{2n}}{(2n)!} + \dots \quad (5)$$

и ограничиваясь двумя членами ряда (5), получим из (4)

$$d\lambda = \frac{\theta^2}{2} dz. \quad (6)$$

При малых прогибах  $\theta = y'$ . Тогда полное продольное перемещение конца стержня получается из (6) интегрированием по всей длине стержня –

$$\lambda = \frac{1}{2} \int_0^l y'^2 dz, \quad (7)$$

а критическая сила из выражения (1) будет определяться формулой

$$P_{кр} = \frac{U_{изг}}{\lambda} = \frac{\int_0^l EI y''^2 dz}{\int_0^l y'^2 dz}. \quad (8)$$

Если продольная сила меньше критической  $P < P_{кр}$ , то стойка каркаса сохраняет вертикальное положение. При  $P > P_{кр}$  каркас теряет устойчивость, его ось изгибается, что вызывает выпадение кладки и разрушение стены.

Потеря устойчивости, как это следует из приведенных формул, зависит от величины продольной силы ( $P$ ) (т.е. от приходящейся на данную стойку нагрузки – веса вышележащей части конструкции), материала (модуль упругости  $E$ ), геометрии сечения балки каркаса, а также от условий закрепления каркаса, определяющих его прогиб  $y$  (8).

Если балка каркаса закреплена шарнирно, прогиб  $y$  определяется уравнением [1]:

$$y = C \sin kz. \quad (9)$$

Учитывая граничные условия шарнирного закрепления – при  $z = 0$  и  $z = l$ ,  $y = 0$ , получим  $kl = \pi n$ . Тогда продольная сила  $P$ , вызывающая потерю устойчивости стержня, будет

$$P = \frac{\pi^2 n^2 EJ}{l^2}. \quad (10)$$

Здесь  $n$  – произвольное целое число. Наименьшая же критическая сила  $P_{кр}$  будет при  $n = 1$ :

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EJ}{l^2}. \quad (11)$$

Если балка каркаса жестко закреплена в фундаменте (при  $z = 0, y = 0, y' = 0$ ) и имеет подвижный шарнир вверху (при  $z = l, y = 0$ ), то прогиб  $y$  определяется уравнением:

$$y = C(\sin kz - kl \cos kz + k(l - z)). \quad (12)$$

В этом случае наименьшая критическая сила, вызывающая потерю устойчивости, будет [1]:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EJ}{(0,7l)^2}. \quad (13)$$

Таким образом, получены критические силы для жесткого и шарнирного закрепления стоек каркаса в фундаменте, и, как было указано выше, превышение веса перекрытия допустимых значений  $P_{кр}$  может вызвать потерю устойчивости элемента каркаса, его изгиб и, как следствие, выпадение заполнителя – кладки.

$$\delta A = \delta A_\sigma + \delta A_p + \delta A_u = - \int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV - \int_V \rho_n \ddot{u} \delta \bar{u} dV + \int_V \rho_n \bar{g} \delta \bar{u} dV = 0, \quad (14)$$

где  $\bar{u}$ ,  $\varepsilon_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  – вектор перемещений, тензоры деформаций и напряжений соответственно, а  $\delta \bar{u}$ ,  $\delta \varepsilon_{ij}$  – их изохронные вариации;  $\rho_n$  – плотность материала элементов системы (кладки и каркаса).

Граничные условия на жестком основании зданий приняты однородными:

$$z = 0: \delta u = \delta v = \delta w = 0. \quad (15)$$

Третье слагаемое в уравнении (14) – работа инерционных сил – учитывается в случае, если решается динамическая задача о собственных колебаниях; в статической задаче – в напряженно-деформированном состоянии это слагаемое отсутствует.

Метод конечных элементов позволяет учитывать реальную геометрию, различие геометрических и физико-механических параметров, составляющих конструкцию элементов, наличие в них

## Разработка математической модели и выбор метода расчета

Влияние каркаса на деформацию и напряженное состояние рассматривается на примере квадратного (4×4 м) в плане строения. Две противоположные его стены усилены каркасом с шагом 1 м, две другие выполнены без усиления. Конструкция постройки показана на рис. 3. Постройка находится только под действием собственного веса, в результате чего она подвергается вертикальной осадке.

Модель представляет собой коробку, в которой несущие стены – это плоско напряженные пластины, а перекрытия – жесткие диски, опирающиеся на несущие стены. Стены усилены вертикальным деревянным каркасом, представляющим собой вертикальные стойки, соединенные по граням пластины, образуя коробку с горизонтальными дисками перекрытий. Изгиб пластин не рассматривается.

Исходным уравнением для решения поставленной задачи методом конечных элементов является вариационное уравнение, выражающее равенство нулю суммы работ внутренних напряжений ( $\delta A_\sigma$ ), работы массовых сил (веса) ( $\delta A_p$ ) и сил инерции ( $\delta A_u$ ) на возможных перемещениях:

проемов, т.е. фактически производится расчет реальной упругой (в этом смысле, конечно, идеализированной) пространственной конструкции [9; 10; 12]. При этом ее пространственное поведение создается за счет трех возможных перемещений граней и элементов каркаса конструкции, без учета изгиба плоских элементов (стен).

Расчет конструкции по МКЭ включает в себя следующие этапы:

1. Разбивка рассматриваемой конструкции на определенное число конечных элементов, соединенных в узловых точках.

2. Получение матрицы жесткости и масс (при динамическом нагружении конструкции) для элементов, составляющих конструкцию.

3. Формирование общих матриц жесткости, масс и матрицы нагрузки для всей конструкции.

4. Решение системы алгебраических (при статическом нагружении) уравнений для опреде-

ления неизвестных перемещений или решение алгебраической задачи на собственные значения при определении частот и форм собственных колебаний конструкции.

5. Определение компонентов деформаций по полученным перемещениям узлов.

6. Определение напряжений по полученным компонентам деформаций.

Реализация указанных этапов начинается, как отмечено выше, с получения дискретной модели здания.

Дискретная модель здания может включать плоские прямоугольные и подкрепляющие их стержневые конечные элементы. Последние учитываются в том случае, если стены здания усилены каркасом. При этом неизвестными, как и в методе перемещений, являются перемещения узловых точек: по 2 (вертикальное и горизонтальное) – для угла элемента, находящегося в плоскости стен, и по 3 (два горизонтальных и вертикальное) – для углов, приходящихся на грань конструкции. Перемещения  $u_e$  и  $v_e$  точек внутри  $e$ -го плоского элемента (рис. 2) аппроксимируются линейными функциями, откуда вытекает условие непрерывности перемещений вдоль общих сторон ( $x = \text{const}$  или

$y = \text{const}$ ) смежных прямоугольных элементов (14) [2–3; 11; 13]:

$$\begin{aligned} u_e &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy, \\ v_e &= a_5 + a_6x + a_7y + a_8xy. \end{aligned} \quad (16)$$

Перемещения  $w_e$  точек  $e$ -го балочного элемента каркаса (рис. 3) в направлении одной из осей, перпендикулярной оси  $x$ , представляются функцией (17):

$$w_e = \beta_1 + \beta_2x + \beta_3x^2 + \beta_4x^3, \quad (17)$$

а в направлении оси  $x$  (18):

$$u_e = \gamma_1 + \gamma_2x. \quad (18)$$

Опуская изложение обычной процедуры МКЭ для построения матриц жесткости и масс элементов [2–3; 11; 13], приведем окончательные формулы МКЭ для этих матриц, а также компоненты деформаций и напряжений для  $e$ -го элемента, необходимые для расчетов.

Матрица жесткости плоского элемента  $[k_i^e]$  (рис. 1) имеет восьмой порядок и определяется по формуле (19) [13].

$$[k_i^e] = \frac{Eh}{12(1-\mu^2)} \times \begin{bmatrix} 4\frac{b}{a} + 2\frac{a}{b}(1-\mu) & \frac{3}{2}(1+\mu) & 2\frac{b}{a} - 2\frac{a}{b}(1-\mu) & \frac{3}{2}(1-3\mu) & -2\frac{b}{a} - \frac{a}{b}(1-\mu) & -\frac{3}{2}(1+\mu) & -4\frac{b}{a} + \frac{a}{b}(1-\mu) & -\frac{3}{2}(1-3\mu) \\ & 4\frac{a}{b} + 2\frac{b}{a}(1-\mu) & -\frac{3}{2}(1-3\mu) & -4\frac{a}{b} + \frac{b}{a}(1-\mu) & -\frac{3}{2}(1+\mu) & -2\frac{a}{b} - \frac{b}{a}(1-\mu) & \frac{3}{2}(1-3\mu) & 2\frac{a}{b} - 2\frac{b}{a}(1-\mu) \\ & & 4\frac{b}{a} + 2\frac{a}{b}(1-\mu) & -\frac{3}{2}(1+\mu) & -4\frac{b}{a} + \frac{a}{b}(1-\mu) & \frac{3}{2}(1-3\mu) & -2\frac{b}{a} - \frac{a}{b}(1-\mu) & \frac{3}{2}(1+\mu) \\ & & & 4\frac{a}{b} + 2\frac{b}{a}(1-\mu) & -\frac{3}{2}(1-3\mu) & -2\frac{a}{b} - 2\frac{b}{a}(1-\mu) & \frac{3}{2}(1+\mu) & -2\frac{a}{b} - \frac{b}{a}(1-\mu) \\ & & & & 4\frac{b}{a} + 2\frac{a}{b}(1-\mu) & \frac{3}{2}(1+\mu) & 2\frac{b}{a} - 2\frac{a}{b}(1-\mu) & \frac{3}{2}(1-3\mu) \\ & & & & & 4\frac{a}{b} + 2\frac{b}{a}(1-\mu) & -\frac{3}{2}(1-3\mu) & -4\frac{a}{b} + \frac{b}{a}(1-\mu) \\ & & & & & & 4\frac{b}{a} + 2\frac{a}{b}(1-\mu) & -\frac{3}{2}(1+\mu) \\ & & & & & & & 4\frac{a}{b} + 2\frac{b}{a}(1-\mu) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где  $a, b$  – размеры  $e$ -го прямоугольного конечного элемента, определяемые выбранной сеткой разбиения панели стены;  $h$  – толщина стены;  $E$  – модуль упругости материала кладки стены, выбираемый из экспериментальных или справочных данных;  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала стены.

Здесь полученная матрица отличается от матрицы жесткости для элемента стержня при совмест-

ном учете деформаций изгиба и растяжения – сжатия [13] тем, что в ней учитываются только линейные деформации.

Матрица жесткости балочного элемента при совместном учете трех поступательных перемещений для каждого узла в направлении осей  $x, y, z$  (рис. 2.) имеет шестой порядок и определяется по формуле (20).

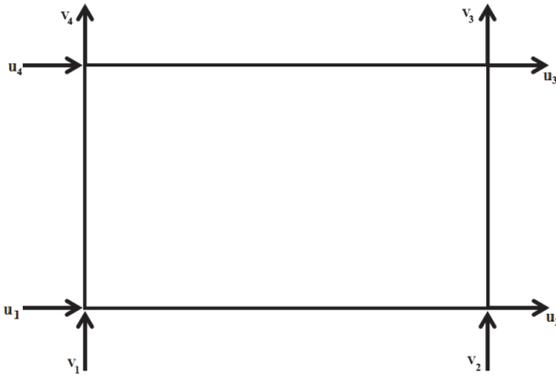


Рис. 1. Прямоугольный элемент стены, работающий в условиях плоского напряжения [Figure 1. Rectangular wall element, working under flat stress condition]

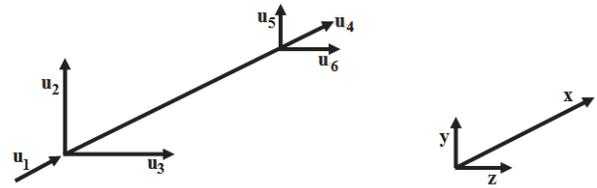


Рис. 2. Пространственный элемент каркаса, работающий в условиях растяжения – сжатия и линейного перемещения в двух взаимно перпендикулярных к оси стержня направлениях [Figure 2. The spatial element of the framework, working under conditions of tension – compression and linear displacement in two directions mutually perpendicular to the axis of the rod]

$$[k_{\sigma}^e] = \begin{bmatrix} \frac{EF}{a} & 0 & 0 & -\frac{EF}{a} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EJ_y}{a^3} & 0 & 0 & -\frac{12EJ_y}{a^3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12EJ_z}{a^3} & 0 & 0 & -\frac{12EJ_z}{a^3} \\ -\frac{EF}{a} & 0 & 0 & \frac{EF}{a} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EJ_y}{a^3} & 0 & 0 & \frac{12EJ_y}{a^3} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{12EJ_z}{a^3} & 0 & 0 & \frac{12EJ_z}{a^3} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

где  $E$  – модуль упругости древесины вдоль волокон, используемой в качестве каркаса;  $F$  – площадь поперечного сечения балки;  $J_y, J_z$  – моменты инерции относительно осей  $y$  и  $z$ ;  $a$  – длина элемента.

Учитываемая при решении динамических задач матрица масс  $e$ -го плоского элемента имеет вид [13]

$$[m_n^e] = \frac{\rho abh}{36} \begin{bmatrix} 4 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 4 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 4 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 4 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 4 & 0 & 2 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 4 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где  $\rho$  – плотность материала;  $h$  – толщина панели.

Матрица масс балочного элемента для анализа динамических задач с учетом поперечных и продольных линейных перемещений принимает вид (22)

$$[m_{\sigma}^e] = ma \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & 0 & \frac{1}{6} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13}{35} & 0 & 0 & \frac{9}{70} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{13}{35} & 0 & 0 & \frac{9}{70} \\ \frac{1}{6} & 0 & 0 & \frac{1}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9}{70} & 0 & 0 & \frac{13}{35} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{9}{70} & 0 & 0 & \frac{13}{35} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Объединение матриц жесткости и масс всех элементов, согласно процедуре МКЭ, приводит к общим матрицам жесткости  $[K]$  и масс  $[M]$  для всего здания и получению разрешающих уравнений поставленной задачи. В зависимости от характера задачи это могут быть алгебраические уравнения относительно неизвестных перемещений узловых точек  $\{u_i\}$  при заданной статической нагрузке  $\{P\}$  –

$$[K]\{u_i\} = \{P\} \quad (23)$$

или система однородных дифференциальных уравнений (динамическая задача о собственных колебаниях) –

$$[M] \left\{ \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \right\} + [K] \{u_i\} = 0, \quad (24)$$

которая в конечном счете сводится к определению собственных частот ( $\omega$ ) и форм колебаний  $\{X\}$  однородной алгебраической системы уравнений:

$$([K] - \omega^2 [M]) \{X\} = 0, \quad (25)$$

где  $\omega$  и  $\{X\}$  – искомые частота и вектор формы собственных колебаний здания, т.е. динамические характеристики постройки;  $\{P\}$  – вектор массовых

сил – вес постройки, распределенный по узлам конечно-элементной модели.

В первом случае система (23) решается с использованием схемы Холецкого, которая особенно эффективна для положительно определенных ленточных матриц, т.к. в процессе вычислений сохраняется ленточная структура матрицы  $[K]$ . При этом сначала выполняется треугольное разложение матрицы и вычисляется ее определитель, а затем находится решение исходной системы уравнений, т.е. неизвестные  $\{u_i\}$ , без обращения матрицы  $[K]$ .

После нахождения узловых перемещений  $\{u_i\}$  при помощи уравнений Коши определяются компоненты деформаций в каждом элементе:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy_i} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_e}{\partial x} \\ \frac{\partial v_e}{\partial y} \\ \frac{\partial u_e}{\partial y} + \frac{\partial v_e}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+y}{a+ab} & 0 & -\frac{y}{ab} & 0 & \frac{y}{ab} & 0 & \frac{1-y}{a-ab} & 0 \\ 0 & -\frac{1+x}{b+ab} & 0 & -\frac{a+x}{b+b} & 0 & \frac{1}{b} & 0 & -\frac{x}{ab} \\ -\frac{1+x}{b+ab} & \frac{1+y}{a+ab} & \frac{1-x}{b-ab} & \frac{y}{b} & \frac{x}{ab} & 0 & -\frac{x}{ab} & \frac{1-y}{a-ab} \end{bmatrix} \{u_i\}. \quad (26)$$

По полученным деформациям (26), используя закон Гука, выражающий зависимость между напряжениями и деформациями, напряжения в каждом элементе определяются по формулам:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy_i} \end{Bmatrix}. \quad (27)$$

После чего полученные напряжения в каждом элементе сравниваются с расчетными, на основании чего делается вывод о прочности конструкции.

Задача о собственных значениях (25) решается методом одновременных итераций Рунтисхаузера [14], учитывающим ленточную структуру матриц  $[K]$  и  $[M]$ .

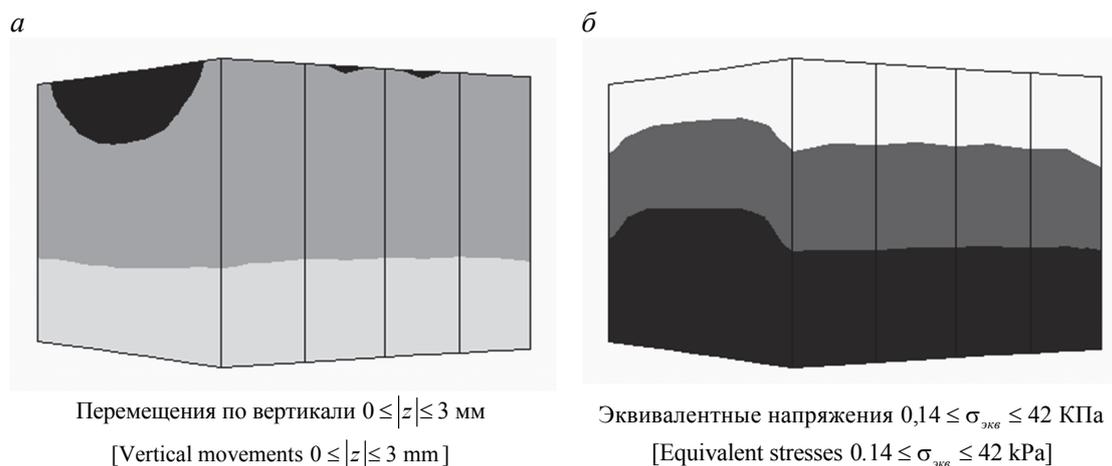
Авторами были разработаны алгоритмы и программы статического расчета (23) напряженно-деформированного состояния и определения динамических характеристик (25) пространственных моделей индивидуальных жилых домов с каркасным усилением. Ниже на примерах показана ре-

ализация разработанных алгоритмов и программ расчета.

### Результаты расчета постройки с деревянными каркасами

Результатами статических расчетов (3) являются перемещения  $\{u\}$  узловых точек конечно-элементной дискретизации, по которым определяются компоненты деформаций (формулы Коши) и напряжений (закон Гука). Сравнение полученных напряжений с расчетными дает основание делать вывод о прочности конструкции [8]. При расчетах были использованы физико-механические характеристики (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность) для кладки из необожженного кирпича и сосны в продольном направлении.

На рис. 3 представлены вертикальное перемещение осадки и возникающее в стенах эквивалентное напряжение, полученные методом конечных элементов с дискретизацией стержневыми (для каркаса) и плоскими (для кладки) элементами [4–7].



**Рис. 3. Вертикальная осадка (а) и эквивалентные напряжения (б) в стенах постройки с неравномерным каркасом по периметру**  
[Figure 3. Vertical sediment (a) and equivalent stresses (b) in the walls of the building with an uneven framework around the perimeter]

Интенсивность закрашки на рисунке соответствует интенсивности исследуемого параметра: вертикального смещения (а) – от 0 (внизу) до 3 мм (вверху) и эквивалентного напряжения (б) от 0,14 КПа (вверху) до 42 КПа (внизу). Темная область в центральной верхней части боковой панели указывает, что по сравнению с другими частями поверхности эта область подвержена большему вертикальному смещению, тогда как усиленная каркасом передняя панель более устойчива (рис. 3, а). Область наибольших эквивалентных напряжений (темная окраска на рис. 3, б) расположена в нижней части постройки. Распределение этой области по периметру неравномерно: на фасаде она занимает нижнюю треть, а в боковых панелях она достигает половины высоты постройки, т.е. значительные напряжения в неусиленных каркасом боковых панелях распределены по большей площади, подвергая эти панели риску разрушения.

### Выводы

Таким образом, сравнительные исследования напряженно-деформированного состояния симметричного в плане индивидуального жилого дома под симметричной нагрузкой (собственный вес) позволили выявить влияние каркасного усиления стен на деформацию и возникающие в стенах напряжения.

Статический эффект от каркасного усиления заключается в восприятии жесткими элементами каркаса приложенной статической нагрузки, вызывающей в них незначительную деформацию, передающуюся на простенки между элементами

каркаса, приводя к равномерному распределению и общему снижению уровня напряжений в стенах по сравнению со стенами без каркаса. Это дает основание рекомендовать установку каркаса в стенах построек из местных материалов.

Авторами выполнены многочисленные натурные испытания и теоретические исследования небольших построек из малопрочных местных материалов [4–8], в которых предложен экспериментально-теоретический подход к определению физико-механических характеристик материала построек и рассмотрены проблемы их прочности и сейсмостойкости.

© Раззаков С.Ж., Жураев Б.Г., Жураев Э.С., 2018



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

### Список литературы

1. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1972. 544 с.
2. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 542 с.
3. Zienkiewicz O.C. Three-dimensional analysis of buildings composed of floor and wall panels. July 1971. Vol. 49. Pp. 319–332.
4. Раззаков С.Ж. Исследование напряженно-деформированного состояния одноэтажной постройки с внутренней перегородкой при статической оттягивающей нагрузке по верхнему поясу строения // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 6. С. 14–19.
5. Раззаков С.Ж. Влияние каркасного усиления на напряженно-деформированное состояние двухэтажной постройки из малопрочных материалов // Строитель-

ная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 4. С. 43–49.

6. Razzakov S.J. Experimental and theoretical approach to the determination of physical and mechanical characteristics of the material of the walls of the low-strength materials // European Science Review. 2016. No. 7–8. Pp. 215–216.

7. Razzakov S.J. The study of seismic stability of a single-storey building with an internal partition with and without taking into account the frame // European Science Review. 2016. No. 7–8. Pp. 217–220.

8. Razzakov S.J., Akhmedov P.S., Chulponov O.G., Mavlonov R.A. Stretching curved wooden frame-type elements “Sinch” // European Science Review. 2017. No. 1–2. Pp. 223–225.

9. Большаков В.И., Яценко Е.А., Соссу Г., Лемэр М., Рейнуар Ж.М., Кестенс Ж., Кормо И. Основы метода конечных элементов / пер с фр.; отв. ред Е.А. Яценко. Днепропетровск: ПГАСА, 2000. 255 с.

10. Макеев В.Б. Статический расчет зданий из объемных блоков методом конечных элементов: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСИ им. Куйбышева, 1975. 140 с.

11. Синицин А.П. Практические методы расчета сооружений на сейсмические нагрузки. М.: Стройиздат, 1967. 145 с.

12. Handa K.H. Inplane vibration of box-type structures // Journal of Sound and Vibration. 1972. No. 21 (2). Pp. 107–114.

13. Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1974. 342 с.

14. Rutishauser H. Simultaneous Iteration Method for Symmetric Matrices // Numerische Mathematik. 1970. Vol. 16. No. 3. Pp. 205–223. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02219773>.

### Об авторах

**Раззаков Собиржон Жураевич** – доктор технических наук, профессор кафедры строительства зданий и сооружений, декан строительного факультета, Наманганский инженерно-строительный институт (Наманган, Узбекистан). *Область научных интересов:* прочность, устойчивость и сейсмостойкость зданий. *Контактная информация:* e-mail – sobirjonrsj@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-3676-901x. eLIBRARY SPIN-код: 4399-5141.

**Жураев Бахтиёр Гуломжонович** – соискатель, старший преподаватель кафедры строительства зданий и сооружений, Наманганский инженерно-строительный институт (Наманган, Узбекистан). *Область научных интересов:* прочность, конструкционная и сейсмическая безопасность зданий. *Контактная информация:* e-mail – jurayevbaxtiyor74@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-7554-8781. eLIBRARY SPIN-код: 5798-4490.

**Жураев Элербек Собиржон Угли** – соискатель, преподаватель кафедры экономики, Наманганский инженерно-строительный институт (Наманган, Узбекистан). *Область научных интересов:* экономика, экономика строительства и оценка сейсмической безопасности. *Контактная информация:* e-mail – maclaren1988@mail.ru. ORCID iD: 0000-0002-5898-6568. eLIBRARY SPIN-код: 8011-9193.

### Для цитирования

Раззаков С.Ж., Жураев Б.Г., Жураев Э.С. Устойчивость стен индивидуальных жилых домов с деревянным каркасом // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 5. С. 427–435. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-427-435.

RESEARCH PAPER

## Sustainability of walls of individual residential houses with a wooden frame

Sobirjon J. Razzakov\*, Baxtiyor G. Juraev, Elyorbek S. Juraev

Namangan Engineering Construction Institute  
12 I.A. Karimov St., Namangan, 160103, Republic of Uzbekistan

\*Corresponding author

(received: February 18, 2018; revised: September 22, 2018; accepted: October 07, 2018)

**Abstract. The aim of work.** The stability of the walls of individual houses with a wooden frame and the stress-strain state of a single-story structure are investigated, and also problems of their strength and seismic resistance are considered.

**Solution technique.** The development of a methodology for calculating small, simple in form individual houses, with the reinforcement of load-bearing walls by a frame, is described. The methodology includes the following stages: the creation of a mathematical model of structures; choice of the numerical method – the finite element method (FEM), which allows to take into account the structural features of the structure; carrying out calculations of buildings for specified loads. The choice of the finite element method is justified by the possibility of calculating a spatial model that takes into account the real geometry and structural features of the structure.

**Results.** Using the spatial model allowed to take into account in detail the presence of the framework, and analysis of the stress-strain state revealed an increase in the rigidity of the structure with a skeleton, which indicates an increase in

strength, stability, and seismic resistance. The connecting role of the skeleton is revealed, which consists in combining the elements of the structure into a single spatial system. The static effect consists in the perception of the rigid elements of the framework by the applied static load, which causes in them a slight deformation transferred to the piers between the frame elements. This leads to a uniform distribution and a general reduction in the level of stresses in the walls in comparison with the same stresses in walls without a frame.

**Keywords:** individual residential houses, wall, wooden frame, load, tension, deformation, strength, stability, seismic resistance

## References

1. Feodosev V.I. (1972). *Soprotivlenie materialov [Resistance of material]*. Moscow: Nauka Publ., 544. (In Russ.)
2. Zenkevich O.K. (1975). *Metod konechnix elementov v texnike [Finite element method on technic]*. Moscow, Mir Publ., 542. (In Russ.)
3. Zienkiewicz O.C., Parech C.J., Teply B. (1971). Three-dimensional analysis of buildings composed of floor and wall panels. *Pros. Inst. of Civil Engineers*, 49, 319–332.
4. Razzakov S.J. (2016). Research of stress-strain state of single-storey buildings with internal partitions under static pulling load of the upper belt of a structure. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (6), 14–19. (In Russ.)
5. Razzakov S.J., Kholmiraev S.A. (2017). Influence of frame work strengthening on the stress-strain state of two-storey buildings of low-strength materials. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (4), 43–49. (In Russ.)
6. Razzakov S.J. (2016). Experimental and theoretical approach to the determination of physical and mechanical characteristics of the material of the walls of the low-strength materials. *European Science Review*, (7–8), 215–216.
7. Razzakov S.J. (2016). The study of seismic stability of a single-storey building with an internal partition with and without taking into account the frame. *European Science Review*, (7–8), 217–220.
8. Razzakov S.J., Akhmedov P.S., Chulponov O.G., Mavlonov R.A. (2017). Stretching curved wooden frame-type elements “Sinch”. *European Science Review*, (1–2), 223–225.
9. Bolshakov V.I., Yatsenko Ye.A., Sossu G., Lemmer M., Reynuar Zh.M., Kestens Zh., Kormo I. (2000). Yatsenko Ye.A. (Ed.). *Osnovy metoda konechnykh elementov [Basis of finite element method]*. Dnepropetrovsk, PGASA Publ., 255. (In Russ.)
10. Makeyev V.B. (1975). *Sticheskiy raschet zdaniy iz ob'yemnykh blokov metodom konechnykh elementov [Static calculation of buildings from volumetric blocks by the finite element method]* (Cand. Sci. (Eng.) Dissertation). Moscow, MISI im. Kuybysheva Publ., 140. (In Russ.)
11. Sinitsin A.P. (1967). *Prakticheskiye metody rascheta sooruzheniy na seysmicheskiye nagruzki [Practical methods for calculating structures for seismic loads]*. Moscow: Stroyizdat Publ., 145. (In Russ.)
12. Handa K.H. (1972). Inplane vibration of box-type structures. *Journal of Sound and Vibration*, 21(2), 107–114.
13. Postnov V.A. (1974). *Metod konechnykh elementov v raschetakh sudovykh konstruksiy [Finite element method in calculations of ship structures]*. Leningrad: Sudostroyeniye Publ., 342. (In Russ.)
14. Rutishaur H. (1970). Simultaneous iteration method for symmetric matrices. *Num. Math.*, 16(3), 205–223.

### About the authors

**Sobirjon J. Razzakov** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Construction of Buildings and Structures, Dean of the Construction-Technology Faculty, Namangan Engineering Construction Institute (Namangan, Uzbekistan). *Research interests:* strength, stability and seismic resistance of buildings. *Contact:* e-mail – sobirjonrsj@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-3676-901x. eLIBRARY SPIN-code: 4399-5141.

**Baxtiyor G. Juraev** – Competitor, Senior Lecturer of the Department of Construction of Buildings and Structures, Namangan Engineering Construction Institute (Namangan, Uzbekistan). *Research interests:* strength, structural and seismic safety of buildings. *Contact:* e-mail – jurayevbahtiyor74@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-7554-8781. eLIBRARY SPIN-code: 5798-4490.

**Elyorbek S. Juraev** – Competitor, Senior Lecturer of the Department of Construction of Buildings and Structures, Namangan Engineering Construction Institute (Namangan, Uzbekistan). *Research interests:* economics, building economics and evaluation of seismic safety. *Contact:* e-mail – maclaren1988@mail.ru. ORCID iD: 0000-0002-5898-6568. eLIBRARY SPIN-code: 8011-9193.

### For citation

Razzakov S.J., Juraev B.G., Juraev E.S. (2018). Sustainability of walls of individual residential houses with a wooden frame. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14(5), 427–435. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-427-435. (In Russ.)