

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КАРКАСА МАЛОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ ИЗ ЛСТК ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

О. Г. Зинкевич, асс., Н. В. Савицкий, д. т. н., проф.

Ключевые слова: каркасы малоэтажных зданий, ЛСТК, податливые соединения, диафрагмы жесткости, пространственная жесткость каркаса

Введение. Особенности конструкций каркаса из легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) предполагают использование в большинстве случаев шарнирных соединений элементов (наибольшая технологичность узлов соединений элементов, соответствующих шарнирной схеме; сложное НДС тонкостенных профилей при жестком сопряжении). При этом пространственная жесткость здания обеспечивается по связевой схеме – здание рассматривается как пространственная несущая система конструктивных элементов – диафрагм (стен, перекрытий), представляющих собой каркас из тонкостенных профилей, обшитых листовым материалом и характеризующихся податливостью в своей плоскости [5].

Определяющее влияние на пространственную жесткость каркаса имеют вертикальные диафрагмы (наружные и внутренние стены), далее диафрагмы. Жесткостные характеристики горизонтальной диафрагмы (перекрытия) влияют на пространственную жесткость каркаса за счет выгиба в горизонтальной плоскости в пролете между вертикальными диафрагмами (наружными и внутренними стенами), а также опосредованно через характер распределения усилий на вертикальные диафрагмы разной жесткости [2; 6].

Одной из наиболее сложных задач при проектировании системы обеспечения пространственной жесткости здания является оценка распределения горизонтальных нагрузок между ее составляющими, требующая учета соотношения жесткостей элементов.

Анализ публикаций. Для оценки распределения горизонтальных нагрузок между вертикальными диафрагмами (стенами) здания могут использоваться следующие упрощенные подходы [6]:

- распределение горизонтальных усилий в соответствии с грузовыми площадями (перекрытие условно принимается абсолютно гибким в своей плоскости);
- распределение горизонтальных усилий пропорционально жесткостям вертикальных диафрагм (перекрытие условно принимается абсолютно жестким в своей плоскости).

Первый подход может привести к грубым ошибкам, поскольку жесткость перекрытий в большинстве случаев превышает жесткость диафрагм – стены более насыщены проемами. Второй подход точнее отражает действительную работу системы, но в то же время перекрытия в зданиях имеют определенную податливость при сдвиге и изгибе (иногда сопоставимую с прогибами вертикальных диафрагм [1]), поэтому фактические значения воспринимаемых диафрагмами горизонтальных усилий будут несколько отклоняться в ту или иную сторону.

Таким образом, долю нагрузки, воспринимаемой определенной диафрагмой каркаса здания, необходимо определять с учетом соотношения жесткостей всех его составляющих.

Данная задача может быть решена аналитическим методом [1; 2], но эти решения являются достаточно громоздкими, а приведенная в [2] упрощенная методика использует табличные данные для определенных типов конструкций.

В [4] рассматривается методика, учитывающая распределение горизонтальной нагрузки между соседними рамами каркаса с учетом сдвиговой жесткости горизонтальной диафрагмы из стального профилированного настила. Данная методика позволяет производить расчет зданий с равными значениями жесткости рам и их шага, а также одинаковыми характеристиками горизонтальной диафрагмы в разных шагах рам, что не отражает особенностей планировочных решений малоэтажных зданий.

Постановка проблемы. Существующие аналитические методы оценки распределения горизонтальных усилий между вертикальными диафрагмами каркаса здания являются достаточно сложными, а упрощенные методики на их основе применимы для определенных типов конструкций. Жесткости всех элементов каркаса могут быть учтены при расчете МКЭ, что потребует создания достаточно подробных моделей и приведет к большим затратам времени на стадии разработки объемно-планировочного решения и предварительного назначения конструктивных параметров элементов каркаса здания.

Цель статьи – исследовать взаимодействие элементов системы обеспечения пространственной жесткости каркаса здания из ЛСТК с целью упрощенной оценки распределения горизонтальных усилий между ними.

Результаты и их обсуждение. При использовании упрощенной методики расчета с допущением об абсолютной жесткости перекрытия в горизонтальной плоскости, горизонтальное усилие в i -й диафрагме определяется по зависимости

$$P_i = P \frac{V_i}{\sum_i^n V_i}, \quad (1)$$

где P – суммарная горизонтальная нагрузка на перекрытие рассматриваемого этажа, кН;

V_i – сдвиговая жесткость рассчитываемой диафрагмы, кН/см;

$\sum_i^n V_i$ – сумма жесткостей диафрагм, на которые распределяет горизонтальную нагрузку рассматриваемое перекрытие, кН/см.

Фактическая жесткость перекрытия может быть учтена введением в (1) поправочного коэффициента.

Для оценки диапазона получаемых значений и чувствительности распределения горизонтальных усилий к использованию абсолютной жесткости перекрытия или введения фактических ее значений предварительно рассматривались предельные жесткости перекрытия:

а) абсолютно жесткая горизонтальная диафрагма $V_{fl} = \infty$ (перекрытие);

б) бесконечно гибкая горизонтальная диафрагма $V_{fl} = 0$.

Результаты оценки перемещений верхних поясов диафрагм при восприятии ветрового давления для второго типа местности четвертого ветрового района [3] приведены на рисунке 1. Рассчитывались модели зданий с двумя равными пролетами длиной 6 м (одной внутренней диафрагмой) при разных соотношениях жесткости наружных и внутренней диафрагм.

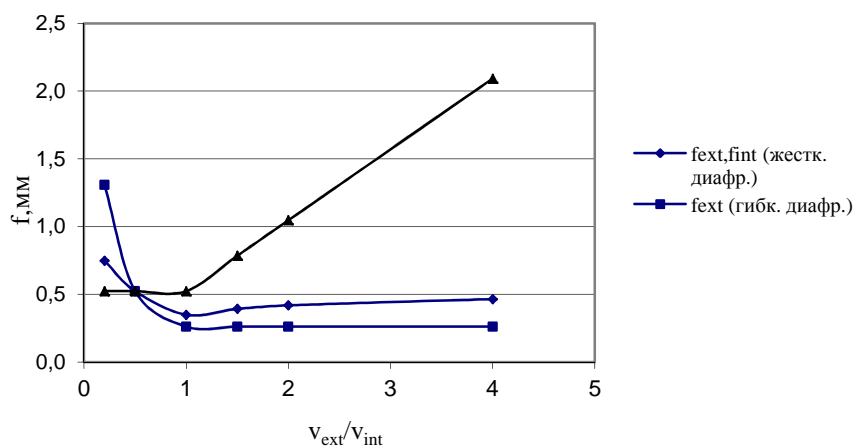


Рис. 1. Перемещения верхнего пояса наружной (f_{ext}) и внутренней (f_{int}) стен для случаев жесткой и гибкой горизонтальной диафрагмы (перекрытия)

Использование упрощенной методики расчета с допущением об абсолютно жестком перекрытии приводит к некоторому завышению горизонтальных усилий в диафрагмах большей жесткости и занижению в диафрагмах меньшей жесткости. При дальнейшем учете фактической жесткости перекрытия более жесткие диафрагмы будут разгружаться, менее жесткие – догружаться, что приведет к увеличению перемещений в горизонтальной плоскости.

Некоторое завышение усилий при упрощенном расчете может быть допущено в «запас прочности», заниженные значения необходимо откорректировать введением поправочных коэффициентов, учитывающих соотношение жесткостей элементов каркаса здания.

Причем поправочные коэффициенты для наружных и внутренних диафрагм будут разными вследствие разности грузовых площадей. Так, при нескольких равных по длине пролетах для наружной стены поправочный коэффициент будет меньше, поскольку разгрузка или догрузка при учете податливости перекрытия будет происходить с меньшей грузовой площади.

Для оценки влияния соотношения жесткостей элементов каркаса на распределение горизонтальных усилий между вертикальными диафрагмами выполнялись расчеты ряда моделей зданий МКЭ. Рассматривались модели с одной и тремя внутренними диафрагмами, принимались различные конфигурации наружных и внутренних диафрагм для получения различных соотношений их жесткостей. Шаг диафрагм для всех моделей принят 6 м. Податливость горизонтальной диафрагмы (перекрытия) принималась равной во всех пролетах модели с определенными значениями сдвиговой жесткости (в модели изменялась жесткость связей каркаса перекрытия с обшивкой [5]) для приближения характера работы перекрытия от гибкого к жесткому.

Из расчета моделей определялись значения перемещений верхних поясов диафрагм, по которым при известной сдвиговой жесткости определялось значение воспринимаемой горизонтальной нагрузки. Пример полученных зависимостей для модели с одной внутренней диафрагмой приведен на рисунке 2.

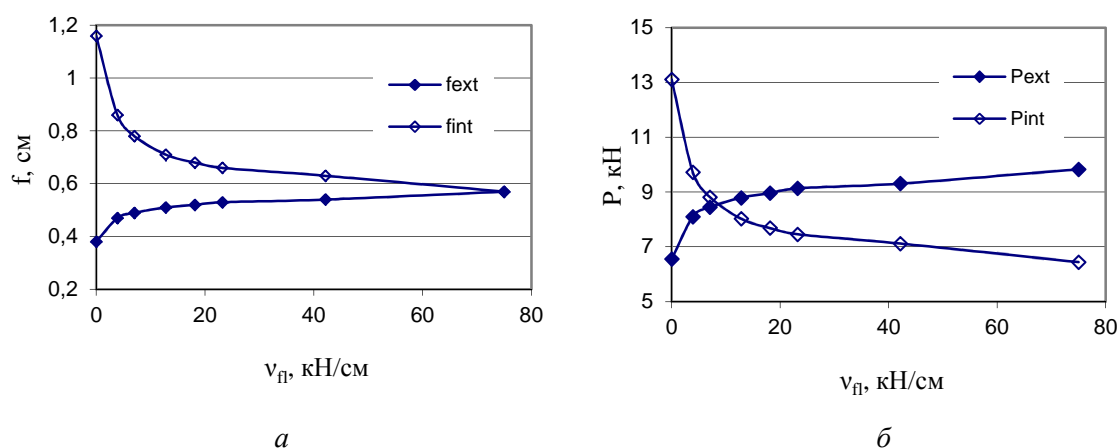


Рис. 2. Зависимости перемещений верхнего пояса диафрагм (а) и значений горизонтальных усилий, воспринимаемых диафрагмами (б) от жесткости перекрытия в своей плоскости

Характер распределения усилий между вертикальными диафрагмами (стенами) при определенной жесткости перекрытия в основном зависит от соотношения жесткости рассматриваемой диафрагмы с суммарной жесткостью смежных диафрагм, определяемого

$$k = \frac{v_i}{(v_{i-1} + v_{i+1})} \quad (2)$$

При рассмотрении абсолютно жесткого перекрытия и соотношения жесткостей диафрагм $k < 1$ часть горизонтального усилия с i -й средней диафрагмы будет распределяться на смежные, что приведет к занижению воспринимаемого горизонтального усилия сравнительно с расчетом, где учитывается фактическая жесткость перекрытия.

Исходя из этого, поправочный коэффициент для упрощенной модели с абсолютно жестким перекрытием устанавливается по двум параметрам:

- соотношение жесткостей диафрагм $k = \frac{v_i}{(v_{i-1} + v_{i+1})}$;
- соотношение жесткостей диафрагмы и перекрытия v_i/v_{fl} .

При расчете рассматриваемых моделей МКЭ с учетом различных жесткостей перекрытия устанавливалась величина отклонения горизонтального усилия (ΔP , %), передаваемого на диафрагму перекрытием определенной жесткости, от усилия, полученного по упрощенной методике с допущением о перекрытии абсолютной жесткости, определяемая

$$\Delta P = \left(\frac{P_v}{P_\infty} - 1 \right) \cdot 100, \% \quad (3)$$

где P_v , кН – горизонтальное усилие, воспринимаемое диафрагмой, определенное с учетом некоторой жесткости перекрытия (при расчете модели здания МКЭ);

P_∞ – горизонтальное усилие, воспринимаемое диафрагмой, определенное с учетом абсолютной жесткости перекрытия.

Положительные значения ΔP соответствуют занижению величин воспринимаемой горизонтальной нагрузки, полученных по упрощенной методике, отрицательные значения – завышению.

Полученные зависимости значений ΔP от соотношения жесткостей элементов в каркасе для наружных и внутренних стен (вертикальных диафрагм) приведены на рисунке 3.

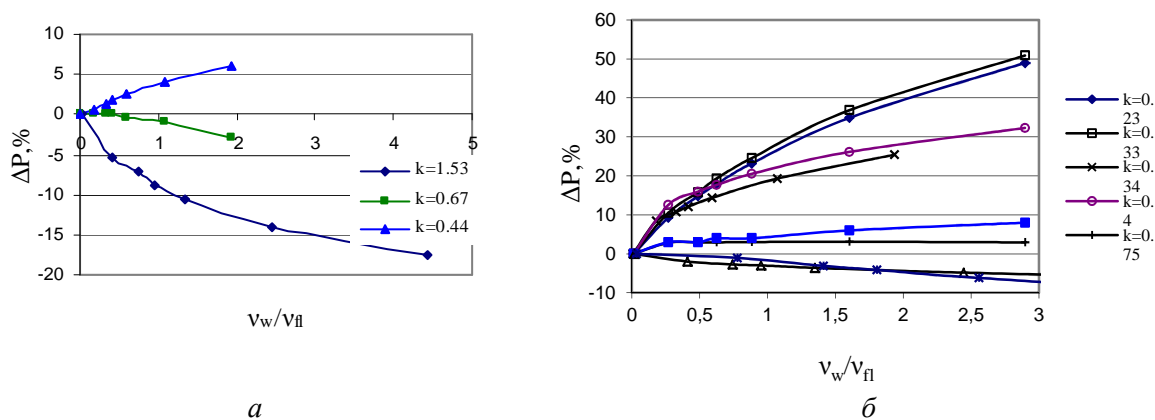


Рис. 3. Зависимости отклонений значений горизонтальной нагрузки, воспринимаемой наружными (а) и внутренними (б) вертикальными диафрагмами, полученные по расчету моделей и упрощенной методике

При значительной разнице жесткостей вертикальных диафрагм (рассматриваемой и смежных) их система, распределяющая между собой горизонтальную нагрузку, более чувствительна к жесткости перекрытия – применение упрощенной модели с допущением об абсолютно жестком перекрытии дает большее отклонение от фактического результата.

Переход от гибкого перекрытия к жесткому оказывает наибольшее влияние на величину воспринимаемой горизонтальной нагрузки и перемещение внутренних диафрагм с меньшей жесткостью (относительная жесткость внутренней диафрагмы $k = 0,33$). При использовании упрощенной модели для них значительно занижаются значения воспринимаемых усилий и перемещений.

В случае приближения значений жесткости рассматриваемой диафрагмы и суммарной жесткости смежных диафрагм ($k \rightarrow 1$), а также при большей жесткости внутренней диафрагмы ($k > 1$) использование упрощенной модели с абсолютно жестким перекрытием дает минимальное отклонение в сторону занижения воспринимаемого усилия и, соответственно, перемещений в первом случае ($k = 0,75$) и незначительного завышения значений во втором ($k = 1,14$). Для таких соотношений жесткость перекрытия влияет незначительно.

В рассмотренных моделях жесткости перекрытия в горизонтальной плоскости во всех пролетах условно приняты равными. Фактически, вследствие разности длины пролетов, конструктивных особенностей, наличия проемов и т. д. жесткости перекрытия в разных пролетах могут отличаться.

Для оценки влияния разной жесткости перекрытия в пролетах здания на распределение горизонтальной нагрузки между стенами рассматривался ряд моделей, где жесткости перекрытий в своей плоскости изменялись за счет изменения жесткости связей обшивки с каркасом, а также разности длины пролетов (от 6,0 до 2,4 м). По результатам расчета, отличия горизонтальных усилий, воспринимаемых вертикальными диафрагмами, полученных для моделей с разной жесткостью перекрытия в пролетах и моделей с равной жесткостью перекрытий, составляют не более 10 %.

Такое незначительное влияние разности жесткости перекрытия в разных пролетах можно объяснить тем, что стены, как правило, более насыщены проемами, чем перекрытия, и их жесткость значительно меньше.

Для упрощения расчета при разной жесткости перекрытия в смежных к рассматриваемой диафрагме пролетах для определения соотношения v_w/v_{fl} принимается минимальное значение жесткости в одном из пролетов. В этом случае поправочный коэффициент в соответствии с рисунком 3 будет принят в сторону увеличения, т. е. для предварительной оценки могут быть

использованы коэффициенты, полученные по зависимостям для перекрытия с равной жесткостью в пролетах.

В случае значительного расхождения жесткости перекрытия в смежных пролетах – наличия в перекрытии крупных проемов (лестничная клетка, второй свет), при предварительной оценке распределения горизонтальных усилий между диафрагмами нагрузку с этого пролета можно распределить между диафрагмами по грузовым площадям (условно приняв нулевую жесткость перекрытия в пролете с проемом), а диафрагмы, ограничивающие рассматриваемый пролет, считать наружными.

Таким образом, полученные зависимости отклонения горизонтального усилия, передаваемого на диафрагму перекрытием определенной жесткости, от усилия, полученного по упрощенной методике расчета с допущением о перекрытии абсолютной жесткости – ΔP , учтенные введением поправочного коэффициента C , позволяют учитывать соотношение жесткостей элементов каркаса для оценки распределения горизонтальных усилий между стенами здания (вертикальными диафрагмами) с использованием упрощенного подхода.

Горизонтальное усилие в i -т диафрагме, определенное по упрощенной методике расчета (предположение об абсолютной жесткости перекрытия) с учетом поправочного коэффициента, определяется по зависимости

$$P_i = P \frac{V_i}{\sum_i^n V_i} C, \quad (4)$$

где P – суммарная горизонтальная нагрузка на перекрытие рассматриваемого этажа, кН;

V_i – сдвиговая жесткость рассчитываемой диафрагмы, кН/см;

$\sum_i^n V_i$ – сумма жесткостей диафрагм, на которые распределяет горизонтальную нагрузку рассматриваемое перекрытие, кН/см.

C – поправочный коэффициент, учитывающий соотношение жесткостей рассматриваемой диафрагмы и смежных диафрагм, а также, рассматриваемой диафрагмы и перекрытия, приведен в таблице.

Т а б л и ц а

Значения поправочного коэффициента C

Соотношение жесткостей диафрагмы и перекрытия	Соотношение жесткостей диафрагмы и смежных диафрагм	Поправочный коэффициент C
внутренние диафрагмы (стены)		
$v_w/v_{fl} < 1$	$k < 0,75$	$C = 1,2$
	$0,75 \leq k \leq 1$	$C = 1,1$
	$k > 1$	$C = 1,0$
$1 \leq v_w/v_{fl} \leq 2$	$k < 0,75$	$C = 1,3$
	$0,75 \leq k \leq 1$	$C = 1,1$
	$k > 1$	$C = 1,0$
$2 < v_w/v_{fl} < 3$	$k < 0,75$	$C = 1,5$
	$0,75 \leq k \leq 1$	$C = 1,1$
	$k > 1$	$C = 1,0$
наружные диафрагмы (стены)		
	$k < 0,6$	$C = 1,1$
	$k \geq 0,6$	$C = 1,0$

Выводы. 1. Использование упрощенной методики расчета с допущением об абсолютной жесткости перекрытия приводит к некоторому завышению горизонтальных усилий в диафрагмах большей жесткости и занижению в диафрагмах меньшей жесткости. При дальнейшем учете фактической жесткости перекрытия более жесткие диафрагмы будут разгружаться, менее жесткие – догружаться, что приведет к увеличению перемещений в горизонтальной плоскости.

2. Полученные зависимости отклонения горизонтального усилия, передаваемого на диафрагму перекрытием определенной жесткости, от усилия, полученного по упрощенной методике расчета с допущением о перекрытии абсолютной жесткости, – ΔP , учтенные введением поправочного коэффициента C , позволяют учитывать соотношение жесткостей элементов каркаса для оценки распределения горизонтальных усилий между стенами здания (вертикальными диафрагмами) с использованием упрощенного подхода.

3. Разработана упрощенная методика, учитывающая влияние соотношения жесткостей всех элементов каркаса малоэтажного здания на распределение горизонтальных усилий между вертикальными диафрагмами, которая может быть использована на стадии разработки объемно-планировочного решения и предварительного назначения конструктивных параметров элементов каркаса здания.

4. Значения горизонтальных усилий, воспринимаемых отдельными вертикальными диафрагмами каркаса, полученных по разработанной упрощенной методике, могут отличаться на почти 50 % от усилий, полученных при распределении нагрузки пропорционально жесткостям вертикальных диафрагм (допущение об абсолютно жестком перекрытии), что учитывается соответствующими коэффициентами.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Байков В. Н.** Железобетонные конструкции: Общий курс. [Учеб. для вузов]. – 5-е изд., перераб и доп. / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов // – М. : Стройиздат, 1991. – 767 с.

2. **Дроздов П. Ф.** Конструирование и расчет несущих систем многоэтажных зданий и их элементов. [Учеб. пособ. для вузов]. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Дроздов П. Ф. – М. : Стройиздат, 1977. – 223 с.

3. Навантаження і впливи. Норми проектування: ДБН В.1.2-2:2006. – К. : Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2006. – 78 с.

4. Рекомендации по учету жесткости диафрагм из стального профилированного настила в покрытиях одноэтажных производственных зданий при горизонтальных нагрузках. – М., 1980. – 25 с.

5. **Савицький М. В.** Вплив конструктивних особливостей на жорсткість стін-діафрагм в каркасних будівлях з ЛСТК / М. В. Савицький, О. Г. Зінкевич, А. М. Зінкевич // Вісник Дніпропет. нац. ун-ту залізнич. Трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 37. – С. 169 – 173.

6. Residential structural design guide: 2000 Edition [Text] – W., 2000. – 434 p.

УДК 624.014 : 693.977

Взаимодействие элементов каркаса малоэтажного здания из ЛСТК при обеспечении пространственной жесткости / О. Г. Зинкевич, Н. В. Савицкий // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПГАСА, 2013. – № 1 – 2. – С. 13 – 19. – рис. 3. – табл. 1. – Библиогр.: (6 назв.).

На основе расчета моделей МКЭ исследовано взаимодействие элементов системы обеспечения пространственной жесткости каркаса малоэтажного здания из ЛСТК с целью упрощенной оценки распределения горизонтальных усилий между ними. Разработана упрощенная методика оценки распределения горизонтальных усилий между вертикальными диафрагмами, которая может быть использована на стадии разработки объемно-планировочного решения и предварительного назначения конструктивных параметров элементов каркаса здания.

Ключевые слова: *каркасы малоэтажных зданий, ЛСТК, податливые соединения, диафрагмы жесткости, пространственная жесткость каркаса.*

Взаємодія елементів каркаса малоповерхової будівлі з ЛСТК при забезпеченні просторової жорсткості / М. В. Савицький, О. Г. Зінкевич // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2013. – № 1 – 2. – С. 13 – 19. – рис. 3. – табл. 1. – Бібліогр.: (6 назв.).

На основі розрахунку моделей МСЕ досліджено взаємодію елементів системи забезпечення просторової жорсткості каркаса малоповерхової будівлі з ЛСТК з метою спрощеної оцінки розподілу горизонтальних зусиль між ними. Розроблено спрощену методичку оцінки розподілу горизонтальних зусиль між вертикальними діафрагмами, яка може бути застосована на стадії розробки об'ємно-планувального рішення та попереднього призначення конструктивних параметрів елементів каркаса будівлі.

Ключові слова: *каркаси малоповерхових будівель, ЛСТК, податливі з'єднання, діафрагми жорсткості, просторова жорсткість каркаса.*

Interaction of elements of low-rise buildings frames from cold-formed thin gauge steel members in lateral force resisting system / N. V. Savitsky, O. G. Zinkevych // Visnyk of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. – D. : PSACEA, 2013. – № 1 – 2. – P. 13 – 19. – pic. 3. – tabl. 1. – Bibliogr.: (6 names).

On the basis of FEM models an interaction of elements of low-rise buildings frames from cold-formed thin gauge steel members in lateral force resisting system was investigated. The purpose was to simplify an estimation of lateral force distribution between braced walls. The simplified approach for estimation of lateral force distribution between braced walls that may be used for preliminary building frame's structures design was developed.

Key words: *low-rise buildings' frames, cold-formed thin gauge steel members, yielding connections, braced walls, lateral force resisting system.*