

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СЕЙСМОСТОЙКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

## ИССЛЕДОВАНИЯ ДОМОСТРОИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С НЕСУЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА НА СЕЙСМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

*Айзенберг Я.М., д-р техн. наук, проф., почетный академик РААСН,  
Смирнов В.И., Акбиев Р.Т., кандидаты техн. наук,  
Шишлянников А.А., Акбиев Д.А., инженеры  
(ЦНИИСК им.В.А.Кучеренко филиал ФГУП НИЦ «Строительство»),  
Феофанов В.В., директор  
(ЗАО «Град Петра»)*

### 1. Проблема.

В настоящее время в развитых странах мира одним из перспективных направлений эффективного строительства является применение легких металлических конструкций в зданиях промышленного, гражданского, сельскохозяйственного и иного назначения. Снижение металлоемкости зданий достигается за счет применения в качестве несущих конструкций стальных тонкостенных холодногнутого профиля. Профили фирмы «Град Петра», представленные в работе, изготавливаются из металлического оцинкованного листа толщиной 1,5 мм (ГОСТ 14918-80). Основной вид применяемого профиля показан на рис.1. Данные профили располагают в стеновых панелях с шагом 400-600 мм. Высота панелей равна высоте этажа здания.

Тонкостенные холодногнутые стальные элементы обеспечивают небольшой вес конструкций в сравнении с традиционными несущими конструкциями. Это является особым преимуществом при использовании в сейсмостойком строительстве, поскольку снижение веса влечет за собой снижение инерционных сейсмических нагрузок. Однако сейсмостойкость систем из рассматриваемых элементов исследована недостаточно. Настоящая работа является первым комплексным исследованием рассматриваемой системы с выполнением статических и динамических испытаний, при интенсивных нагрузках, превышающих расчетные сейсмические нагрузки.

### 2. Цели исследований.

Целями исследований являются анализ рассматриваемой системы с точки зрения ее способности сохранять несущую способность при расчетных сейсмических воздействиях и разработка на этой основе рекомендаций по применению систем в сейсмостойком строительстве.

Раздел экспериментальных исследований выполнен при ограниченном количестве образцов, имеющихся в распоряжении, и при ограниченном числе вариантов соеди-

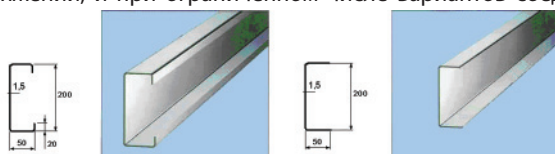


Рис.1. Стальной тонкостенный профиль

нения несущих элементов (колонн, горизонтальных элементов). Поэтому, выводы работы носят предварительный характер. Эти выводы будут уточнены после проведения дополнительных экспериментальных и теоретических исследований.

### 3. Принципиальная методика исследований.

#### 3.1. Расчетно-теоретический анализ.

Перед проведением экспериментальных исследований осуществлен расчетно-теоретический анализ несущей способности отдельных колонн и одноэтажного фрагмента здания, выполненного в натуральную величину.

Критическая нагрузка на одну стойку по требованиям устойчивости согласно СНиП II-23-81\* «Стальные конструкции» составляет 2500 кг.

В табл.1 приведены результаты расчетно-теоретического анализа одноэтажного фрагмента здания. Расчетный начальный период собственных колебаний здания по основной форме колебаний составил 0,48 с.

Таблица 1.

#### Результаты расчетно-теоретического анализа

Расчетная сейсмичность площадки	Расчетная сейсмическая нагрузка (т)	Расчетное (упругое) перемещение (мм)
7	0,755	4,3
8	1,510	8,6
9	3,023	17,2

### 3.2. Экспериментальные исследования

#### 3.2.1. Определение предельной вертикальной нагрузки для несущих стальных холодногнутого стоек.

Предельная вертикальная нагрузка на стеновые панели (отдельные стойки) определялась согласно схеме, приведенной на рис.2.

#### 3.2.2. Определение предельных значений горизонтальной нагрузки и горизонтального перемещения при постоянной вертикальной нагрузке для панелей и отдельных стоек.

Схемы загрузки стеновых панелей при совместном воздействии вертикальной и горизонтальной нагрузок приведены на рис.3.

Нагрузка  $P$  — критическая сила, определенная из испытаний стеновых панелей на вертикальную нагрузку. Вертикальная нагрузка  $0,8P, 0,4P, 0,2P$  соответствует реальной вертикальной нагрузке на колонны первого этажа в трех, двух и одноэтажных зданиях соответственно.

**3.2.3. Определение предельных значений горизонтальной нагрузки и горизонтального перемещения для одноэтажного фрагмента здания, выполненного в натуральную величину.**

Схема загрузки одноэтажного фрагмента здания горизонтальной нагрузкой приведена на рис.4.

Постоянная вертикальная нагрузка  $P$  равна 10000 кг, что соответствует реальной вертикальной нагрузке на колонны (стены) одноэтажного здания, одинакового в плане с испытуемым фрагментом.

**3.2.4. Динамические испытания одноэтажного фрагмента здания, выполненного в натуральную величину.**

Схема проведения динамического испытания одноэтажного фрагмента здания приведена на рис.5.

Динамическая нагрузка создавалась при помощи вибромашины ВИД-12, установленной на перекрытие одноэтажного фрагмента здания. В качестве регистрирующей аппаратуры применялись акселерометры АТ 1105, установленные на колоннах в уровне перекрытия. В качестве обрабатывающей аппаратуры использовался комплекс измерительно-вычислительный МИС-036.

**4. Экспериментальные образцы.**

**4.1. Стойки.**

В качестве экспериментальных образцов при проведении испытаний конструкций на совместное воздействие вертикальной и горизонтальной нагрузок использовались стойки из стального тонкостенного холодного профиля ГПС. На рис.6 приведен эскиз стойки и сечение профиля ГПС.

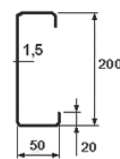
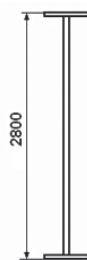


Рис.6. Эскиз стойки и сечение профиля ГПС

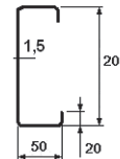
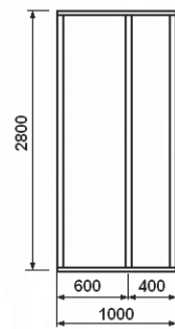


Рис.7. Эскиз панели и сечение профиля стоек

**4.2. Панели.**

В качестве экспериментальных образцов при проведении испытаний конструкций на вертикальное воздействие, а также на совместное воздействие вертикальной и горизонтальной нагрузок использовались стеновые панели, несущими элементами которых являются стальные тонкостенные стойки. На рис.7 приведен эскиз стеновой панели и сечение профиля стоек.

**4.3. Фрагмент здания.**

Фрагмент здания представляет собою блок-комнату, выполненную в натуральную величину. Схема фрагмента здания приведена на рис.8. Расстояние между стенами продольного направления (вдоль цифровых осей) составляет 3,0 м в осях. Расстояние между стенами поперечного направления составляет 4,3 м в осях. Высота стеновых панелей продольного направления составляет 2,8 м. Высота стеновых панелей поперечного направления составляет 3,0 м. Стены обоих направлений фрагмента здания являются несущими. В качестве несущих конструкций перекрытия используются балки из стального холодного профиля. Высота балок составляет 0,2 м. Шаг балок равен шагу стоек в стенах продольного направления. По балкам и поперечным стенам уложен железобетонный настил толщиной 15 см. Крепление фрагмента здания к силовому полу осуществляется при помощи анкеров (Ш 16 мм).

**5. Описание экспериментального оборудования.**

Для проведения статических испытаний стеновых па-

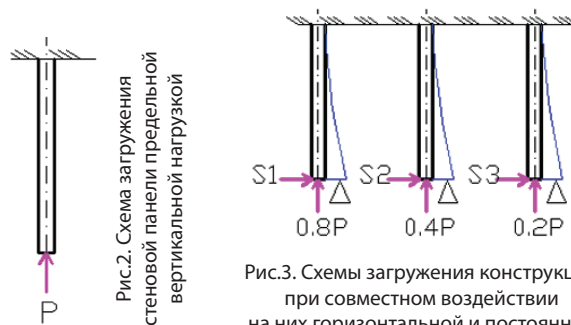


Рис.2. Схема загрузки стеновой панели предельной вертикальной нагрузкой

Рис.3. Схемы загрузки конструкций при совместном воздействии на них горизонтальной и постоянной вертикальной нагрузок

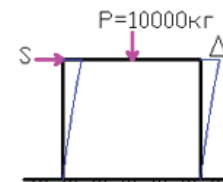


Рис.4. Схема загрузки одноэтажного фрагмента здания горизонтальной нагрузкой



Рис.5. Схема проведения динамического эксперимента

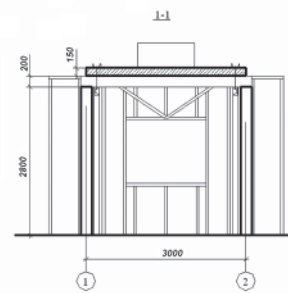
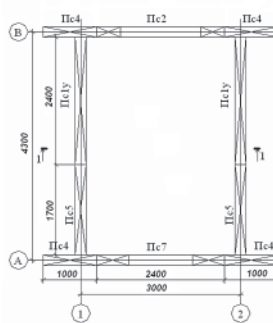


Рис.8. Схема фрагмента здания

нелей и отдельных стоек на вертикальную и горизонтальную нагрузку использовалась силовая рама. Для создания вертикальной и горизонтальной нагрузок применялись гидравлические домкраты ДГ-10. Нагрузка измерялась с помощью манометров, перемещения — с помощью прогибомеров с ценой деления 0,1 мм.

Для проведения статических испытаний фрагмента здания использовались силовые рамы. Для создания горизонтальной нагрузки применялись домкраты ДГ-10, установленные в уровне перекрытия. Перемещения измерялись с помощью прогибомеров с ценой деления 0,01 мм.



Рис.9. Испытание фрагмента здания с применением вибромашины ВИД-12

Динамическая нагрузка создавалась при помощи вибромашины ВИД 12, установленной на перекрытие одноэтажного фрагмента здания (рис.9). В качестве регистрирующей аппаратуры применялись акселерометры АТ 1105. В качестве обрабатывающей аппаратуры использовался комплекс измерительно-вычислительный МІС-036. Комплекс предназначен для сбора, преобразования, регистрации и передачи информации датчиков.

Обработка измерительной информации с помощью стандартных математических и статистических алгоритмов выполнена с помощью программного комплекса WinПОС (пакет обработки сигналов).

## 6. Результаты испытаний.

### 6.1. Определение предельной вертикальной нагрузки на панели (отдельные стойки) из стального тонкостенного холодногнутого профиля.

При испытании стеновых панелей на предельную вертикальную нагрузку разрушение началось с потери устойчивости крайней правой стойки. Фактическая величина критической нагрузки, приходящейся на панель из трех стоек, составила 7500 кг.

Результаты фотофиксации определения критической нагрузки приведены на рис.10.

### 6.2. Определение предельных горизонтальной нагрузки и горизонтального перемещения при постоянной вертикальной нагрузке для панелей и отдельных стоек.

Испытания стеновых панелей происходили в плоскости минимальной жесткости стоек. Испытания проводились



Рис.10. Результаты фотофиксации определения критической нагрузки на стеновую панель



в три этапа. На первом этапе стеновая панель загружалась вертикальной нагрузкой 0,8Р (реальная вертикальная нагрузка на стеновую панель первого этажа в трехэтажном здании). Нагрузка Р — критическая сила, определенная из испытаний стеновых панелей на вертикальную нагрузку и равная 7500 кг. После создания вертикальной нагрузки 0,8Р к панели прикладывалась горизонтальная нагрузка S1. Горизонтальная нагрузка S1 прикладывалась отдельными ступенями до разрушения стеновой панели. Стадия горизонтального нагружения сменялась разгрузением. При этом производился тщательный осмотр элементов испытываемого образца, узлов их соединений, фиксировались перемещения Δ.

На втором и третьем этапе вертикальная нагрузка составила соответственно 0,4Р и 0,2Р. Горизонтальные нагрузки S2, S3 задавали после приложения соответственных вертикальных нагрузок.

Полученные результаты испытания стеновых панелей на совместное воздействие горизонтальной и вертикальной нагрузки, равной 0,8 Р (6000 кг), представлены на рис.11.

Испытания отдельных стоек проводились в четыре этапа. Горизонтальная нагрузка на всех этапах прикладывалась в плоскости максимальной жесткости стоек. На первом этапе стойка загружалась вертикальной нагрузкой 0,8Р (реальная вертикальная нагрузка на стойку первого этажа в трехэтажном здании). Нагрузка Р — критическая сила, определенная из испытаний стеновых панелей на вертикальную нагрузку. После создания вертикальной нагрузки 0,8Р к стойке прикладывалась горизонтальная нагрузка S1. Горизонтальная нагрузка S1 прикладывалась отдельными ступенями до разрушения стойки. Стадия горизонтального нагружения сменялась разгрузением. При этом производился тщательный осмотр элементов испытываемого образца, узлов их соединений, фиксировались перемещения Δ.

На втором, третьем и четвертом этапах вертикальная нагрузка составляла соответственно 0,6Р; 0,4Р; 0,2Р. Горизонтальную нагрузку S2, S3, S4 задавали после приложения соответственных вертикальных нагрузок.

Полученные результаты испытания стоек на совместное воздействие горизонтальной и вертикальной нагрузки, равной 0,8 Р, представлены на рис.12.

### 6.3. Статические испытания одноэтажного фрагмента здания.

Статические испытания одноэтажного фрагмента здания проводились в три этапа с целью определения возможности восприятия зданием расчетных сейсмических нагрузок (табл.1), отвечающих интенсивности 7, 8, 9 баллов соответственно.

Результаты испытаний одноэтажного фрагмента здания на расчетную сейсмическую нагрузку, отвечающую расчетной сейсмичности 9 баллов, приведены на рис.13.

### 6.4. Динамические испытания одноэтажного фрагмента здания.

Динамические испытания



одноэтажного фрагмента здания проводились с целью определения возможности восприятия зданием расчетных сейсмических нагрузок (табл.1), отвечающих интенсивности 7, 8, 9 баллов соответственно. Динамические испытания проведены при вылете дебалансов вибромашины ВИД-12 от 0 до 80 мм. Во время всех испытаний частота вращения дебалансов изменялась от 0 до 5,05 Гц. В результате того, что все динамические испытания были проведены на одном фрагменте здания, жесткость его уменьшилась, а собственная частота колебаний здания изменилась от 2 до 1 Гц.

Динамические характеристики колебаний здания регистрировались при помощи восьми акселерометров АТ1105, установленных на колоннах в уровне перекрытия.

На рис.14 представлена запись акселерометра № 1 в период времени от 72,48 до 125 с после начала испытания при вылете дебалансов вибромашины равном 25 мм.

**6.5. Специфика сейсмического поведения системы.**

Отдельные конструктивные элементы исследуемой системы — гнутые профили, а также фрагмент одноэтажного здания с колоннами из гнутых профилей обеспечили восприятие расчетных сейсмических нагрузок, отвечающих расчетной сейсмической нагрузке 7, 8, 9 баллов при одновременном приложении вертикальной нагрузки и собственного веса конструкции.

Основными особенностями представленной системы, выявленными в ходе статических и динамических испытаний, являются:

1. Значительные горизонтальные перемещения за пределами упругого деформирования колонн. Например, расчетная величина горизонтального перемещения колонны одного этажа при 9-балльной расчетной нагрузке составляет 1,72 см. Фактические горизонтальные перемещения колонны составляли в эксперименте ориентировочно 10-14 см, в зависимости от вертикальной нагрузки. Способность к значительным горизонтальным перемещениям до разрушения является благоприятным фактором с точки зрения сейсмостойкости.

2. Разрушения колонн происходили в результате локальной потери устойчивости стенок профиля. Разрушение стыков не происходило. Такой характер разрушения указывает на благоприятное поведение стыковых соединений при нагрузках, моделировавших сейсмические, при вертикальных нагрузках, отвечающих нагрузкам на первом этаже одно, двух и трехэтажных зданий.

**7. Выводы.**

1. Проведены статические, динамические испытания и расчетно-теоретический анализ зданий с несущими элементами из стальных холодногнутых тонкостенных профилей.

Особенности работы элементов и стыков системы при сейсмической нагрузке выявлены по результатам испытаний одноэтажного фрагмента и колонн одного этажа. Поэтому перенос этих результатов на оценку поведения 2-3 этажных и многоэтажных структур следует производить с осторожностью. Кроме того, раздел экспериментальных исследований выполнен при ограниченном количестве образцов, имеющихся в распоряжении. Поэтому выводы работы носят предварительный характер. Эти выводы будут уточнены по мере расширения объема экспериментальных и теоретических исследований.

2. С учетом объема экспериментальных исследований,

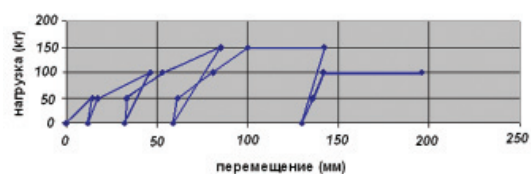


Рис.11. Зависимость горизонтальных перемещений верха стеновой панели от горизонтальной нагрузки при постоянной вертикальной нагрузке равной 0,8 Р (6000 кг)

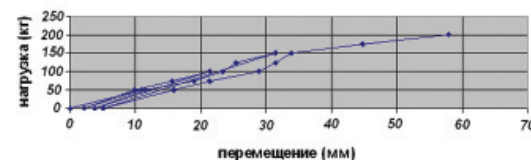


Рис.12. Зависимость горизонтальных перемещений верха стойки от горизонтальной нагрузки при постоянной вертикальной нагрузке равной 0,8 Р (2000 кг)

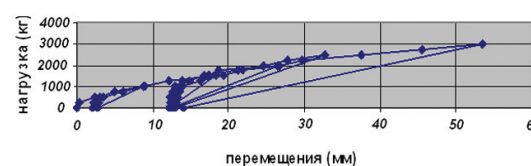


Рис.13. Зависимость горизонтальных перемещений верхних концов стоек одноэтажного фрагмента здания от горизонтальной статической нагрузки

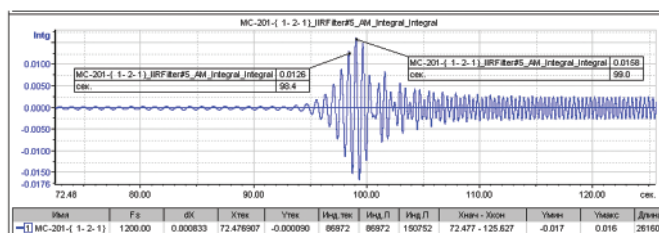


Рис.14. График изменения перемещений (м) верха стойки

а также расчетно-теоретического анализа выполненных в настоящей работе, рекомендуются следующие области применения и ограничения предложенной системы:

- Здания высотой 1 этаж при сейсмичности площадки 7-9 баллов.
  - Здания высотой 2 этажа при сейсмичности площадки 7-8 баллов.
  - Здания высотой 3 этажа при сейсмичности площадки 7 баллов.
3. Результаты исследований позволяют сделать вывод, что система обладает значительной сейсмической живучестью. По-видимому, области применения зданий с несущими элементами из стальных холодногнутых тонкостенных профилей могут быть расширены после проведения дополнительных объемов исследований.

**Литература**

1. СНиП II-7-81\*. *Строительство в сейсмических районах.*
2. СНиП II-23-81\*. *Стальные конструкции.*
3. СНиП 2.01.07-85\*. *Нагрузки и воздействия.*

Материалы хранятся в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко филиал ФГУП НИЦ «Строительство»: 109428, Москва, ул.2-ая Институтская, 6, стр.37. Тел.: (495) 174-70-64.