

На правах рукописи

Нефедов

НЕФЕДОВ ГЛЕБ ВЛАДИМИРОВИЧ

**КОНСТРУКЦИИ ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ НА
КАРКАСАХ ИЗ ЛЕГКИХ СТАЛЬНЫХ ОЦИНКОВАННЫХ
ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ (ЛСТК) НА ПРИМЕРЕ
ЖИЛОГО ДОМА В Д.КРИВСКОЕ КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ**

Специальность 05.23.01- Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2021

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский центр «Строительство», Центральном научно-исследовательском институте строительных конструкций им. В.А. Кучеренко» (АО «НИЦ «Строительство» - ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Ведяков Иван Иванович

Официальные оппоненты: **Белый Григорий Иванович,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный
университет» (СПбГАСУ), профессор кафедры
«Строительные конструкции»

Данилов Александр Иванович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
московский государственный строительный
университет» (НИУ МГСУ), доцент кафедры
«Металлические и деревянные конструкции»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный
университет имени М. К. Аммосова» (СВФУ)

Защита состоится «29» апреля 2021 г в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 303.020.02, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г. Москва, ул.2-я Институтская, д.6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6 и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шулятьев Станислав Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Мировой опыт строительства и эксплуатации многоэтажных жилых и общественных зданий на каркасах из легких металлоконструкций высотой в десять и более этажей насчитывает несколько десятков лет. За это время накоплена статистика, свидетельствующая о безопасности, надежности и высокой энергоэффективности этих зданий (Рисунок 1).

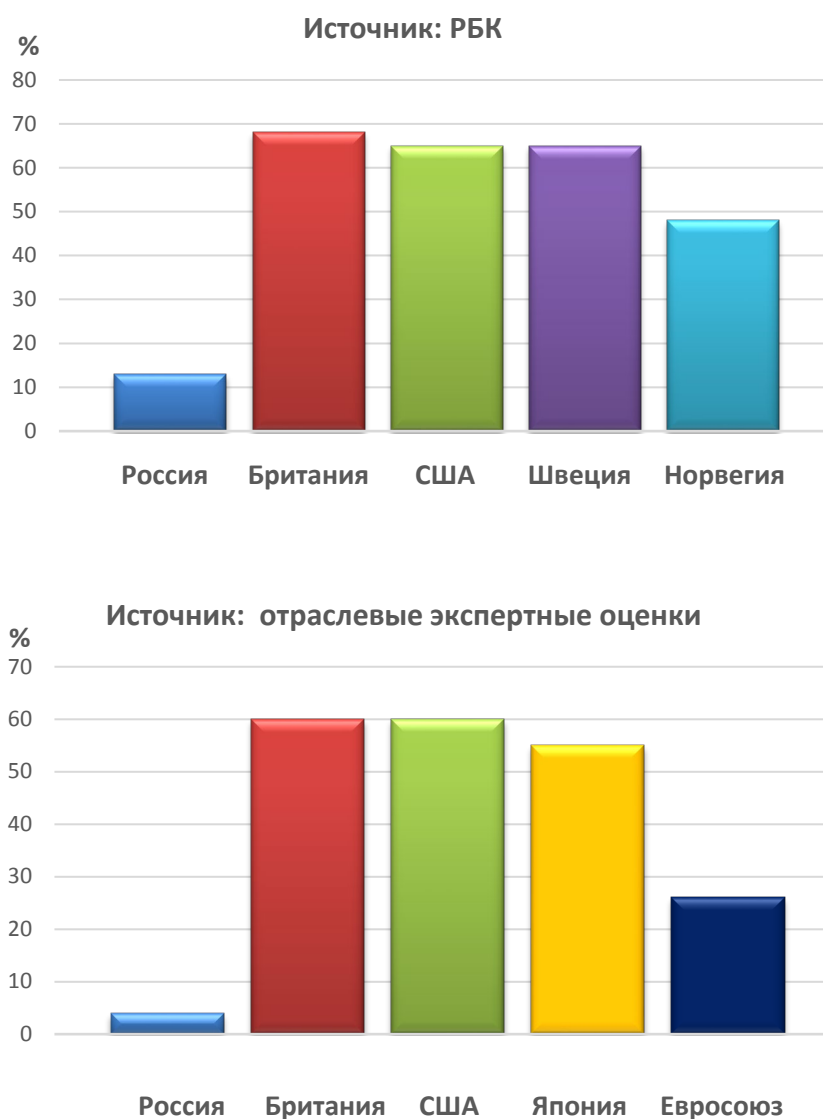


Рисунок 1 - Доля строительства многоэтажных жилых и общественных зданий на основе металлокаркаса из гнутых профилей

Российский опыт возведения таких зданий не столь велик, но уже построен жилой дом высотой шесть этажей в д. Кривское Калужской области (сдан в 2018 г.), который на текущий момент является самым высоким в России жилым зданием, реализованным на несущем каркасе из легких металлических холодногнутых оцинкованных профилей (Рисунок 2).



Рисунок 2 - Жилой дом, Калужская область, д.Кривское

Новизна данной конструкции, а также желание расширить в дальнейшем область применения несущих каркасов из легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) потребовала выполнения научного сопровождения проекта и обоснования принятых проектных решений.

Связано это с тем, что существующие инженерные методы, по которым выполнялся расчет и проектирование несущих конструкций шестизэтажного жилого дома, поставили ряд вопросов, для решения которых потребовалось проведение дополнительных натурных испытаний полноразмерных образцов и фрагментов конструкций.

Актуальность работы заключается в возможности расширения области применения холодногнутых оцинкованных профилей, в новизне конструкции жилого дома, социальной значимости таких объектов.

Степень разработанности темы исследования. Ограниченная нормативная база для расчета и проектирования холодногнутых оцинкованных профилей является на сегодняшний момент основным сдерживающим фактором применения этих конструкций в различных областях строительства. В мире разработаны нормы и стандарты для проектирования конструкций из ЛСТК: европейские нормы проектирования Eurocode 3 [69,70], австралийские нормы AS,

американский стандарт AISC [85] и др. Прямое применение этих нормативных документов на территории Российской Федерации невозможно по ряду причин. В том числе из-за отсутствия их привязки к опыту проектирования, сортаменту выпускаемого металлопроката, отсутствия учета специфики климатических условий строительства.

В Российской Федерации в настоящее время при проектировании и расчете стальных тонкостенных конструкций применяют свод правил СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования» [48]. В странах Евросоюза для подобных расчетов применяют положения европейского стандарта EN 1993-1-3 «Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов» [69] с национальными приложениями. По сути, Свод правил СП 260.1325800.2016 является переработанными европейскими стандартами EN 1993-1-1, EN 1993-1-3, EN 1993-1-5. Однако, использование данного нормативного документа не позволяет в полной мере снять все возникающие вопросы проектирования в части подтверждения несущей способности, огнестойкости, долговечности, коррозионной стойкости, теплоэффективности. В связи с этим, исследование новых типов конструкций для обеспечения их эксплуатационной надежности является важным и актуальным шагом на текущий момент.

Цель работы - развитие и совершенствование инженерной методики расчета и проектирования конструкций зданий из холодногнутых оцинкованных профилей, в том числе с заполнением пенобетоном неавтоклавного твердения.

Задачи исследований:

1. Исследование коррозионной стойкости и долговечности каркаса из оцинкованных холодногнутых профилей в среде пенобетона неавтоклавного твердения;
2. Проведение пожарных испытаний с целью определения предела огнестойкости конструкций, выполненных из стальных холодногнутых профилей с заполнением пенобетоном неавтоклавного твердения;

3. С целью подтверждения теплоэффективности ограждающих конструкций здания провести тепловизионный контроль качества тепловой защиты;
4. Разработка рекомендации по проведению мониторинга здания с целью обеспечения долговременной и безопасной эксплуатации;
5. С целью проверки обоснованности теоретических предпосылок расчета определить экспериментально несущую способность стоек составного сечения из спаренных С-образных профилей при центральном сжатии;
6. С целью проверки обоснованности теоретических предпосылок расчета определить экспериментально несущую способность элементов стеновых панелей, выполненных из спаренных оцинкованных С-образных профилей, с заполнением пенобетоном неавтоклавного твердения с плотностью в диапазоне $300 \div 900 \text{ кг/м}^3$.

Объектом исследования является конструкция здания из холодногнутых оцинкованных профилей с заполнением пенобетоном неавтоклавного твердения жилого шестиэтажного дома.

Предметом исследования является несущая способности, огнестойкость, долговечность, коррозионной стойкость, теплоэффективность многоэтажных зданий с каркасом из тонкостенных холодногнутых оцинкованных профилей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- уточнена инженерная методика расчета конструкций из холодногнутых профилей, в том числе с заполнением пенобетоном;
- разработаны и внедрены рекомендации по проведению мониторинга здания в процессе эксплуатации, а также система контроля за напряженно-деформированным состоянием несущих конструкций, определены величины предельно допустимых перемещений каркаса здания, разработаны схемы расположения и количество наблюдаемых контрольных точек.

Теоретическая значимость работы:

- определено, что частота скрепления С-образных профилей между собой на расстоянии равном $30 i_{ef} \min$ не позволяет в полной мере считать элемент

сплошностенчатым; необходимо дополнительное понижение значения коэффициента условий работы γ_c при определении несущей способности элемента составного сечения;

- выявлен эффект совместной работы стальных стоек каркаса панели и пенобетона при применении пенобетона средней и высокой плотности ($600 \div 900 \text{ кг/м}^3$) и связанное с ним повышение прочности, общей и местной устойчивости стальных стоек;

- получены зависимости « σ - ε » и формы исчерпания несущей способности при центральном сжатии для составных стоек из оцинкованных холодногнутых С-образных профилей в зависимости от их гибкости и соотношения высоты сечения профиля к его толщине.

- получены зависимости « σ - ε » и формы исчерпания несущей способности при центральном сжатии для составных стоек из оцинкованных холодногнутых С-образных профилей в среде пенобетона неавтоклавного твердения в диапазоне плотностей от 300 кг/м^3 до 900 кг/м^3 .

Практическая значимость работы:

- разработаны практические рекомендации по подбору и проверке несущей способности сечений тонкостенных холодногнутых оцинкованных С-образных профилей в среде пенобетона неавтоклавного твердения различной плотности;

- уточнён коэффициент условий работы γ_c для колонн и стоек из спаренных С-образных профилей; уточненное значение коэффициента условий работы γ_c внесено в проект изменений №2 Свода правил СП 260.1325800 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования»;

- получены значения срока службы, долговечности и коррозионной стойкости конструкций из стальных оцинкованных холодногнутых профилей в среде пенобетона неавтоклавного твердения;

- определены пределы огнестойкости конструкций из холодногнутых профилей с заполнением пенобетоном неавтоклавного твердения.

Методология и методы исследования. В рамках диссертационной работы методологической и теоретической базой для определения действительной работы конструкций жилого шестиэтажного дома с каркасом из оцинкованных холодногнутых профилей явились работы отечественных и зарубежных ученых, проведённые натурные испытания. Обработка экспериментальных данных выполнена в соответствии с требованиями и рекомендациями отечественных и зарубежных нормативных документов.

Личный вклад автора заключается в постановке и реализации задач данной работы; определении долговечности, коррозионной и огнестойкости несущих конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей с заполнением пенобетоном; уточнении методики расчета составных стоек из холодногнутых оцинкованных С-образных профилей; уточнении методики расчета составных стоек из холодногнутых оцинкованных С-образных профилей в среде пенобетона неавтоклавного твердения; обработке и анализе данных проведенных численных и экспериментальных исследований; написание на тему диссертации статей для публикации в периодических изданиях.

На защиту выносятся:

- уточненная инженерная методика расчета конструкций из холодногнутых профилей, в том числе с заполнением пенобетоном;
- значения срока службы, долговечности и коррозионной стойкости конструкций из стальных оцинкованных холодногнутых профилей в среде пенобетона неавтоклавного твердения;
- рекомендации по проведению мониторинга несущих конструкций на стадии эксплуатации жилого шестиэтажного дома.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается обоснованным использованием современных апробированных методов численных исследований (в том числе и зарубежных); результатами натурных экспериментальных исследований полноразмерных образцов; использованием сертифицированных программных вычислительных комплексов ANSYS и SCAD Office; хорошей сходимостью результатов численных и натурных исследований;

результатами мониторинга за несущими конструкциями на стадии эксплуатации жилого многоквартирного дома в д. Кривское Калужской области.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на заседании Комитета ТПП РФ по предпринимательству в сфере строительства и Комитета ТПП РФ по предпринимательству в сфере жилищного и коммунального хозяйства на тему «Обсуждение проекта федерального закона «О реновации жилищного фонда в Российской Федерации» (Москва, 2018г.).

Внедрение результатов работы выполнено при проектировании, изготовлении, монтаже и мониторинге жилого многоквартирного дома в д. Кривское Калужской области.

Публикации. По результатам диссертации опубликовано три научные статьи, общим объемом 2 печатных листа (1,42 из которых написаны лично автором), в том числе две статьи, общим объемом 1,27 печатных листов (1,27 из которых написаны лично автором), опубликованные в профильных научных журналах, которые входят в перечень ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендуемых ВАК РФ. Решение, примененное при проектировании и возведении шестиэтажного жилого дома в д. Кривское Калужской области, имеет патент на полезную модель №110108 «Сталебетонное перекрытие».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Объем работы составляет 146 страниц, содержит 111 рисунков, 13 таблиц, списка литературы из 90 наименований, в том числе 30 источников на иностранном языке, и 2 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель и задачи работы, установлены объект и предмет исследования, сформулирована научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы.

В первой главе представлен обзор теоретических и экспериментальных исследований несущей способности тонкостенных конструкций, приведен анализ американских и европейских норм проектирования конструкций из холодногнутох профилей.

В развитие нормативной базы и инженерных методик расчета тонкостенных конструкций внесли вклад российские ученые: И.И. Ведяков, В.В. Зверев, А.Р. Туснин, Б.Н. Решетников, А.И. Колесов, В.А. Гусев, И.В. Урбан, Беляев В.Ф., Белый Г.И. и другие. Результаты работ Т. Кармана, Л. Шумана, Э. Сехлера, Дж. Роудса, Р. Каппуса, Г. Винтера и С. Лау изучавших потерю местной устойчивости в случаях, когда устойчивость теряет полка с отгибом, вошли в основу EN 1993-1 в разделе проверки устойчивости формы сечения. В трудах Д. Девольфа, Д. Харвей, Т. Пекоза, Т. Десмонда были опытно-теоретическим путем определены рекомендуемые размеры холодногнутох профилей, диапазон их соотношений с толщиной профиля. Параметры профилей были основаны на коэффициенте устойчивости таких элементов. Их труды легли в основу расчета по EN 1993-1.

По результатам проведенного анализа научных работ обоснована актуальность данной работы, изложены цели и задачи.

Поставленные в работе задачи решены аналитически и подтверждены экспериментальными исследованиями на полномасштабных фрагментах и натурных конструкциях.

Во второй главе рассмотрен стандарт на проектирование, изготовление и возведение несущих и ограждающих конструкций из пенобетона и стальных холодногнутох профилей. Целью разработка стандарта служила необходимость

систематизации существующих нормативных требований по проектированию и объединения их в единый документ.

Долговечность зданий, наружные стены которых выполнены из оцинкованных холодногнутых профилей с пенобетоном, определяется долговечностью самого пенобетона, а также долговечностью оцинкованных холодногнутых профилей в пенобетоне, которая характеризуется коррозионной стойкостью оцинкованных холодногнутых профилей. Опыт эксплуатации зданий, стены которых выполнены из ячеистых бетонов, в том числе и пенобетонов, показал, что они ничем не уступают по срокам службы зданий со стенами из кирпича или бетона. Пенобетон D250, применяемый в наружных стенах, как показали испытания на морозостойкость, имеет марку F15.

Пенобетон в рассматриваемых зданиях защищен с наружной стороны, кроме отделки, плитным материалом, что дополнительно увеличивает срок службы таких конструкций.

Долговечность ЛСТК с антикоррозионным цинковым покрытием в пенобетоне определяется следующими процессами:

- цинковое покрытие кислородо- и водонепроницаемо, что предотвращает влияние на электрохимическую коррозию неоднородности состава стали и характера ее обработки. Кроме того, цинк, обладая большим электрическим потенциалом, защищая сталь, выступает в этом случае катодом;

- в пенобетоне изменяется pH (щелочность), начиная с момента его укладки и во время дальнейшей эксплуатации конструкции. В свежееуложенном пенобетоне, изготовленном на портландцементе, величина $pH > 12$, что соответствует щелочной среде, и в процессе схватывания pH быстро снижается и в дальнейшем в процессе эксплуатации величина pH колеблется в пределах 9,5 – 11. Цинковое покрытие устойчиво к коррозии в щелочной среде при изменении pH в этом диапазоне. Его термодинамическая неустойчивость прекращается при $pH < 12$. При снижении $pH < 11$ он становится термодинамически устойчив.

Степень стойкости цинкового покрытия в зависимости от pH хорошо демонстрируется диаграммой (Рисунок 3).

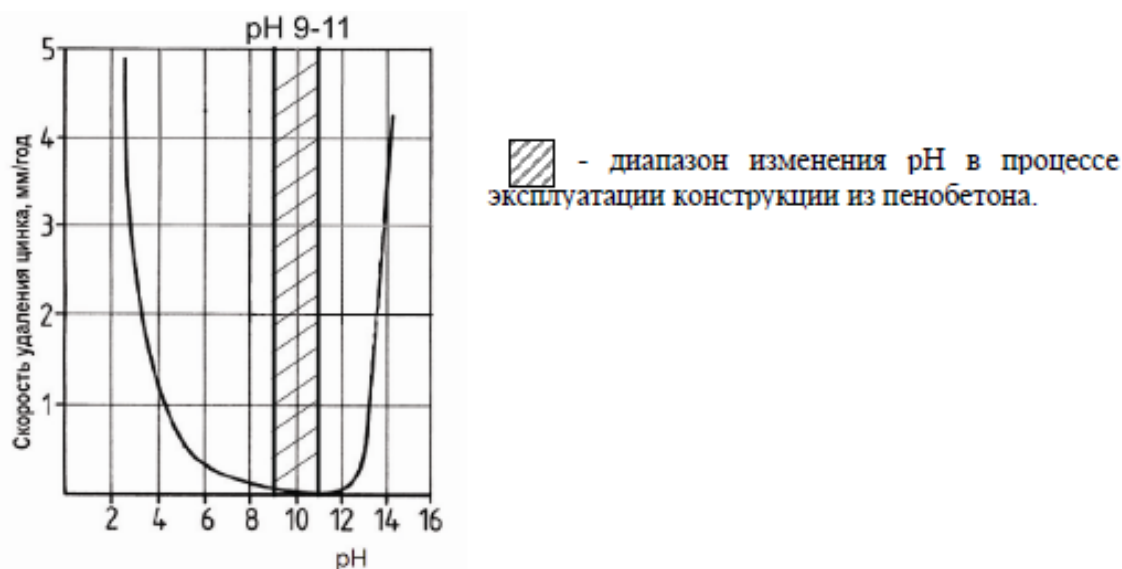


Рисунок 3 - Степень стойкости цинкового покрытия в зависимости от pH

На фрагменте конструкции стены с ЛСТК в пенобетоне D250 и ЦСП 12 мм исследовался процесс высыхания пенобетона. Определялась влажность пенобетона по ГОСТ в изъятых из фрагмента образцах. Стена из пенобетона и ЛСТК выполнена в несъемной опалубке из водостойкого плитного материала толщиной 12 мм. Этот плотный (до 1000 кг/м^3) листовой материал с наружной и внутренней стороны стены не имеет трещин, что обеспечивает защиту от проникновения атмосферных осадков внутрь стены. Трещины с наружной и внутренней стороны отсутствуют. Влажность пенобетона в течение 3-х месяцев с начала заливки достигает 40 % по массе, через 6 месяцев – 15 %. Далее пенобетон в стене здания в процессе его эксплуатации высыхает в течение 1-1,5 лет до равновесной влажности 5-8 %. В дальнейшем она может снизиться до 4 %.

Из приведенных выше условий эксплуатации ЛСТК в пенобетоне с ЦСП при низкой влажности и в щелочной среде следует, что пенобетон и ЦСП являются дополнительной защитой ЛСТК от коррозии.

Теплоаккумулирующие свойства стен здания из оцинкованных холодногнутых профилей и пенобетона определяются теплоаккумулирующими свойствами пенобетона. Они характеризуют количество аккумулированного тепла и отношение времени остывания материала t , сек, к аккумулированному им теплу Q , Дж/м²·°С. Чем меньше величина этого отношения, тем быстрее теряет тепло рассматриваемый материал. На рисунке 4 приведены сравнительные показатели,

характеризующие теплоаккумулирующие свойства материала.

Из приведенного сравнения следует, что у пенобетона и дерева время остывания одинаковое. Однако для нагревания дерева расходуется тепла больше, чем для нагревания пенобетона примерно в 2 раза.

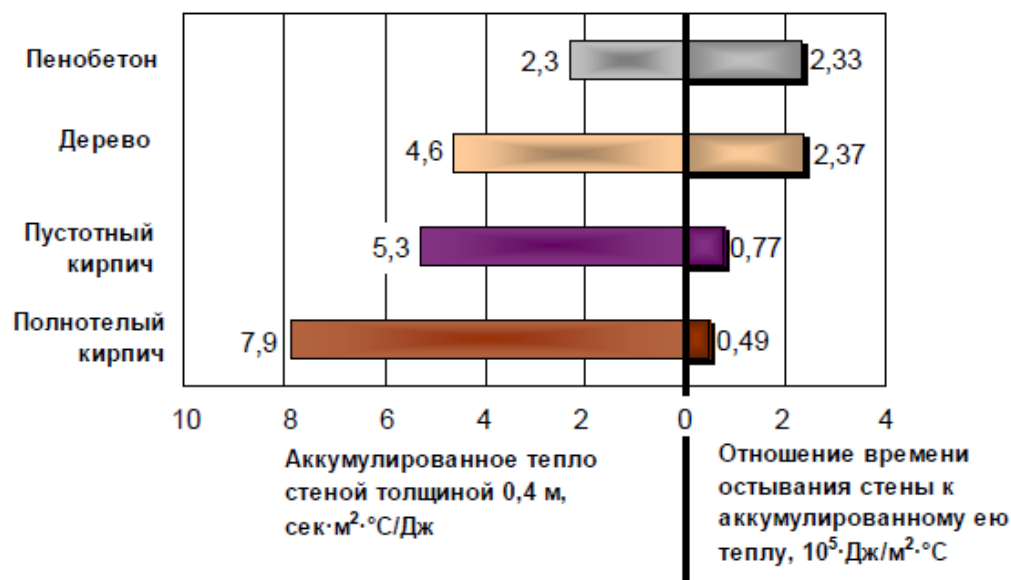


Рисунок 4 - Сравнение показателей теплоаккумулирующих свойств материалов
(по данным «Центра Ячеистых Бетонов»)

Благодаря этим свойствам и характеристикам пенобетон был выбран в качестве материала заполнения для стен здания с каркасом из холодногнутого оцинкованных профилей.

Третья глава посвящена проведению специальных исследований, целью которых было обоснование конструктивной безопасности сооружения, учитывая его особенность и технологическую сложность.

При разработке конструктивной системы жилого шестиэтажного дома на каркасе из ЛСТК ставилась и была успешно решена задача обеспечения соответствия конструкций нормативным требованиям пожаробезопасности для зданий 2-й степени огнестойкости. Пределы огнестойкости примененного конструктива – ЛСТК и пенобетон – не были известны. Поэтому для проверки пределов огнестойкости несущих конструкций зданий и подтверждения их соответствия нормам пожаробезопасности были проведены огневые испытания несущих стеновых панелей и перекрытий зданий с каркасом из холодногнутого

стальных оцинкованных С-образных профилей и заполнением пенобетоном, который выполняет, наряду с прочими функциями – также огнезащитную. Испытания проводились автором совместно со специалистами ИЦ «Огнестойкость» НИЦ «Строительство». Конструкции испытывались под нормативными нагрузками, причем для расширения области допустимых применений таких конструктивных схем на перекрытия прикладывалась нагрузка, соответствующая нормам для читальных, торговых, выставочных залов - 400 кг/м^2 (для жилых - 150 кг/м^2) согласно СП 20.13330 «Нагрузки и воздействия». Для обоих конструктивов – стен и перекрытий – предел огнестойкости по результатам испытаний составил более 90 мин (REI 90).

Причиной коррозионного повреждения оцинкованной стали, находящейся внутри пенобетона, могут быть водяные пары, конденсирующиеся на металлоконструкции в пенобетонном слое. Для определения зоны конденсации водяных паров в многослойной структуре стенового ограждения шестиэтажного жилого дома были проведены теплотехнические расчеты и натурные испытания ограждающих конструкций методом тепловизионной съемки. Как показали теплотехнические исследования, в пенобетонном слое в процессе эксплуатации здания отсутствует возможность конденсации влаги на металлоконструкции. Аппроксимация коррозионного поражения на длительный срок эксплуатации позволяет установить, что скорость коррозии горячего цинкового покрытия в вышеуказанных условиях при сухой или нормальной влажности составит не более $0,5 \text{ мкм/год}$ в течение первых 2-5 лет эксплуатации и уменьшится до $0,3 \text{ мкм/год}$ в последующие годы за счет процессов свободной коррозии и образования защитной пленки на поверхности цинка. Следовательно, за 50 лет реальной эксплуатации максимальное уменьшение толщины слоя цинка составит: $5 \cdot 0,5 + 45 \cdot 0,3 = 16 \text{ мкм}$. Согласно ГОСТ 14918-80, минимальная толщина цинкового покрытия класса 275 составляет 19 мкм. Таким образом, конструкции, изготовленные из марки стали 350 с цинковым покрытием класса 275 толщиной не менее 19 мкм, устойчивы к коррозии и могут эксплуатироваться в среде пенобетона сроком более 50 лет.

Для подтверждения проектных теплотехнических характеристик ограждающих конструкций, а также для выявления дефектов теплозащиты ограждающих конструкций построенного шестиэтажного жилого дома проведена проверка санитарно-гигиенического показателя тепловой защиты здания, включающая:

- проверку превышения на внутренних поверхностях ограждающих конструкций (стен в углах, оконных откосах, покрытий и перекрытий, оконных коробок и рам) температуры точки росы внутреннего воздуха;
- проверку соответствия нормам температурного перепада между температурой внутреннего воздуха и средней температурой внутренних поверхностей ограждающей конструкции.

Термограммы, полученные в ходе испытаний, представлены на рисунке 5. Термограммы сопровождаются температурной шкалой и фотографиями обследованных конструкций.

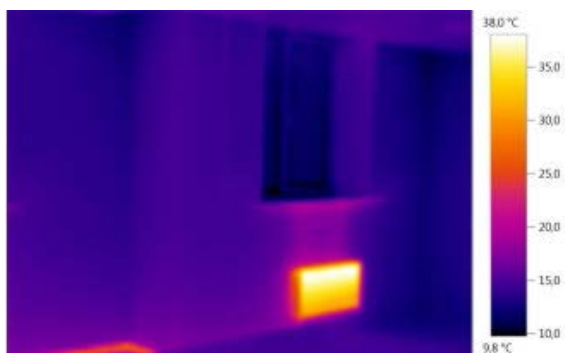


Рисунок 5а - Наружные стены

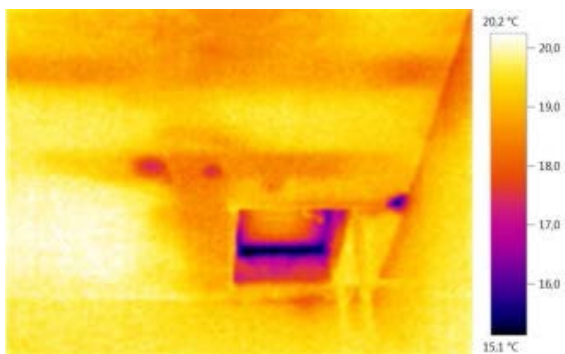


Рисунок 5б - Покрытие (кровля) на лестничной клетке

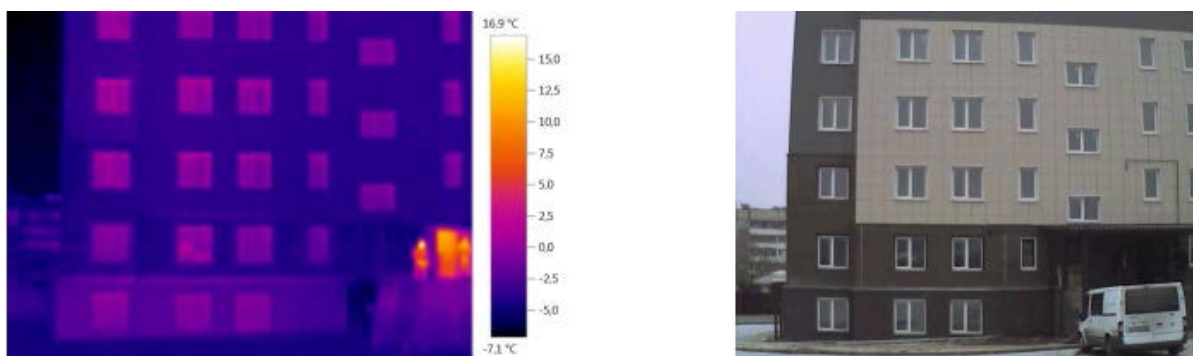


Рисунок 5в - Наружная съемка жилого дома

По результатам теплотехнического исследования установлено:

- температура внутренней поверхности стены почти на 10°C выше температуры «точки росы».
- зона конденсации располагается за пределами внутреннего теплоизолирующего слоя. Это означает отсутствие паров влаги внутри теплоизоляции стены и как следствие:
 - гарантирует неизменность теплотехнических свойств;
 - исключает возникновение условий для развития коррозии конструкций каркаса.

С целью подтверждение соответствия величин перемещений основных несущих конструкций под нагрузкой нормативным значениям СП 20.13330 выполняется мониторинг конструкций жилого шестиэтажного дома.

Всего, в рамках мониторинга, установлено 6 датчиков перемещений (Рисунок 6):

- два датчика горизонтальных перемещений стоек наружной стены;
 - два датчика горизонтальных перемещений стоек внутренней стены;
 - два датчика вертикальных перемещений несущих ферм перекрытия между первым и вторым этажами;
- а также два датчика температуры поверхности:
- один датчик на нижнем поясе фермы перекрытия (рядом с датчиком вертикальных перемещений);
 - один датчик на стойке наружной несущей стены (рядом с датчиком горизонтальных перемещений).

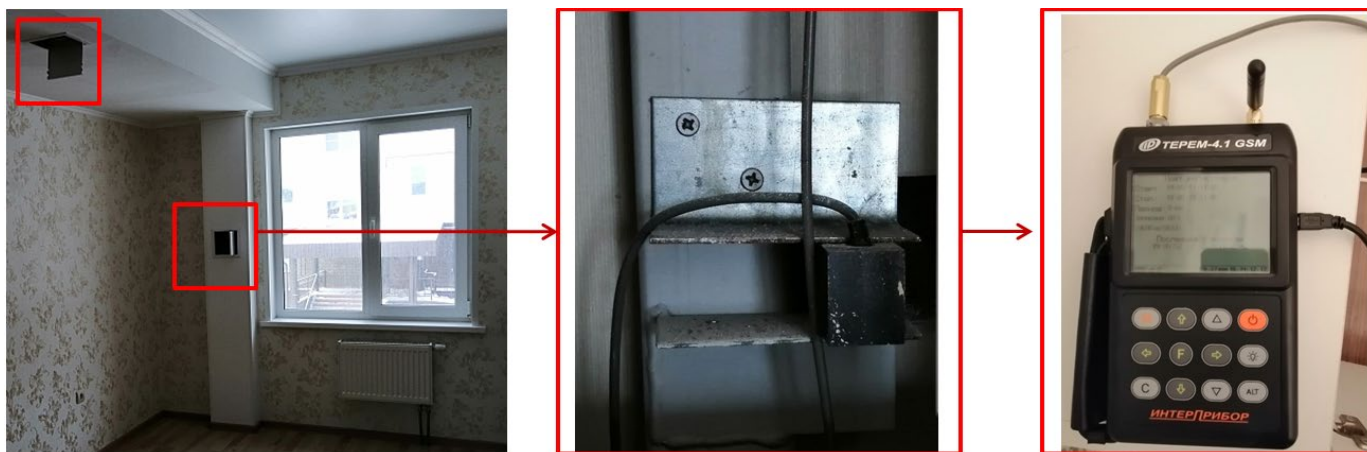


Рисунок 6 - Оборудование для мониторинга

Датчики перемещений установлены на креплениях, изолированных от измеряемых элементов каркаса здания и исключающих одновременное перемещение датчика и измеряемого элемента вследствие деформации под действующей нагрузкой.

По результатам проведенного мониторинга за отчетный период конструкциям присваивается следующая категория:

- работоспособное (контролируемые в процессе мониторинга характеристики не превосходят предельных значений);
- ограниченно работоспособное (контролируемые в процессе мониторинга характеристики достигают предельных значений).

В случае если какой-либо из исследуемых конструкций по результатам мониторинга присвоена категория состояния «ограниченно работоспособное», назначается немедленное проведение визуально-инструментального обследования конструкций здания специализированной организацией с привлечением авторов проекта. Целью такого обследования является обязательное выявление причины возникшего выхода значений за пределы нормативного интервала перемещений и, при необходимости, разработки плана необходимых работ по восстановлению несущей способности конструкции.

Следует отметить, что за весь период наблюдения конструкциям присваивалась только категория – работоспособное.

В четвертой главе представлены экспериментальные исследования

напряженно-деформированного состояния стоек из холодногнутых оцинкованных С-образных профилей. Целью проведения экспериментальных исследований являлась проверка расчетных методик, внесение поправочных коэффициентов и подтверждение сопротивления (прочности и устойчивости) элементов и деформативности при статическом действии нагрузок.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- 1) определение предельных нагрузок, при которых стержень теряет устойчивость;
- 2) определение формы потери несущей способности в зависимости от гибкости стержня;
- 3) получение значений линейных перемещений стойки, деформации стенки С-образного профиля, перемещении под нагрузкой ветвей составной стойки на участках между болтовыми соединениями;
- 4) проверки достоверности результатов теоретических исследований.

Для моделирования работы элементов составного сечения разработаны следующие серии опытных образцов (Таблица 1).

Таблица 1 - Серии опытных образцов

Компоне нт	Сечение, мм. (высота стенки х ширина полки х размер отгиба х толщина)		Высота образца Н, м.	Количес тво опытных образцов , шт.	Марка прокат а по ГОСТ Р52246 -2016	Испытател ьная нагрузка по расчету Р, кгс.
Образец №1		2хАС150х45х12х1,6	3	2	350	7600
Образец №2		2хАС200х75х19,5х2,0	3	2	350	20300
Образец №3		2хАС250х110х24х2,5	3	2	350	37500
Образец №4		2хАС300х90х20х3,0	3	2	350	43000
Образец №5		2хАС360х125х30х3,5	3,6	2	350	72000

Для измерения горизонтальных перемещений контролируемых точек в плоскости и из плоскости составных стоек использовались прогибомеры Аистова-Овчинникова 6ПАО (в плоскости стойки - 3 шт. и из плоскости стойки - 3 шт.). Для измерения вертикальных перемещений стоек под нагрузкой использовались индикаторы часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм (И1 – И2) – 2 шт.

Схема расстановки измерительных приборов представлена на рисунке 7.

Дополнительно в процессе нагружения образца в контрольных точках фиксировались перемещения стенки С-образного холодногнутого профиля из плоскости (депланация) (Рисунок 8а), а также раскрытие зазора между профилями составного элемента (расхождение ветвей на участках между соединяющими болтовыми соединениями) (Рисунок 8б).

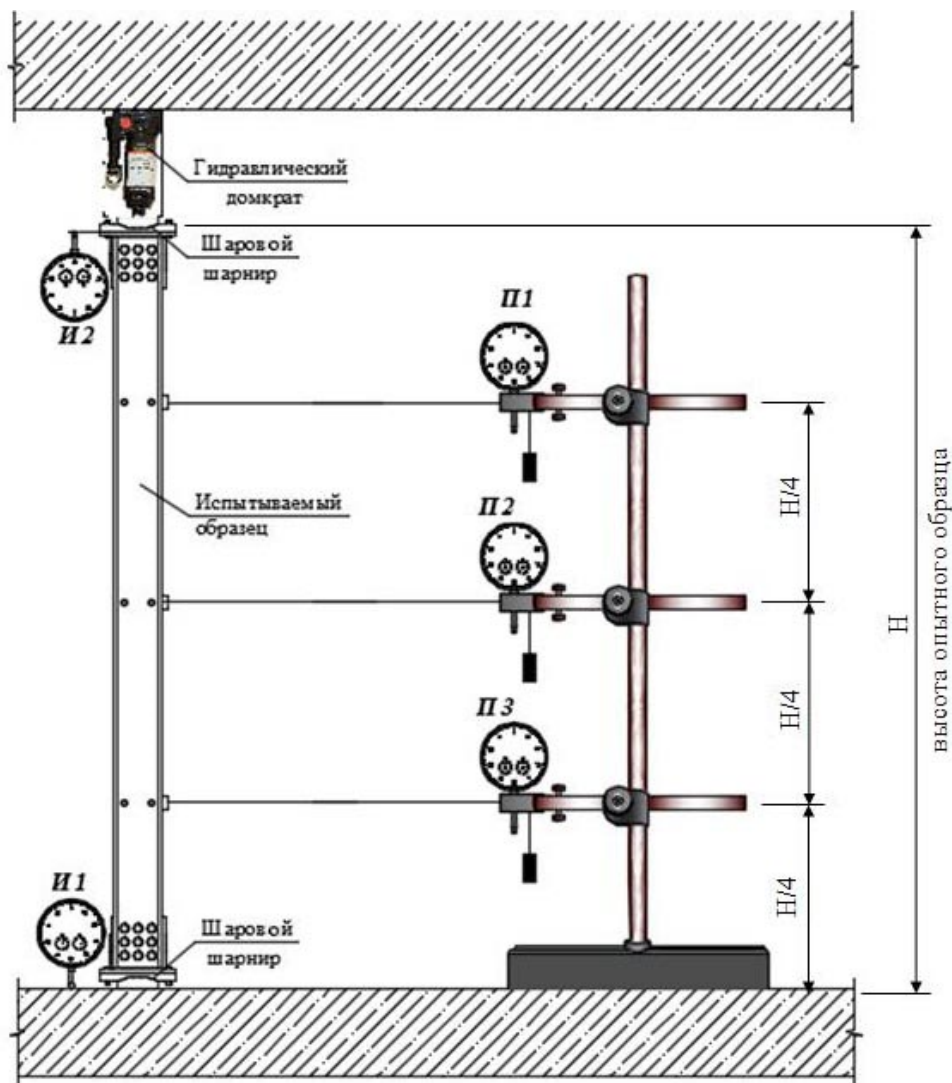
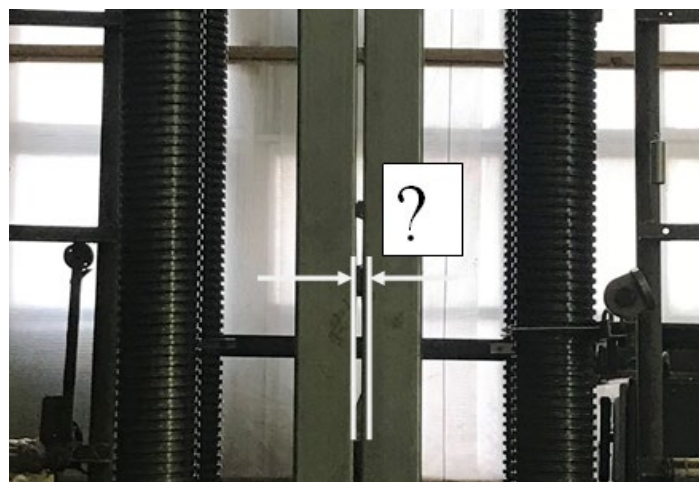


Рисунок 7 - Схема расстановки измерительных приборов («И» - индикатор часового типа, «П» - прогибомер)



а)



б)

Рисунок 8 - Испытываемые образцы: а) контрольные точки перемещений стенки; б) контролируемый зазор между стенками профилей составной стойки

По результатам испытаний были получены: критические нагрузки, прогибы, перемещения стенки профиля из плоскости, раскрытие зазора между профилями. Результаты испытаний сравнивались с конечно-элементным расчетом в программе ANSYS (рисунок 9) и нормативными расчетами в соответствии с СП 260.1325800 и EN 1993-1-3.

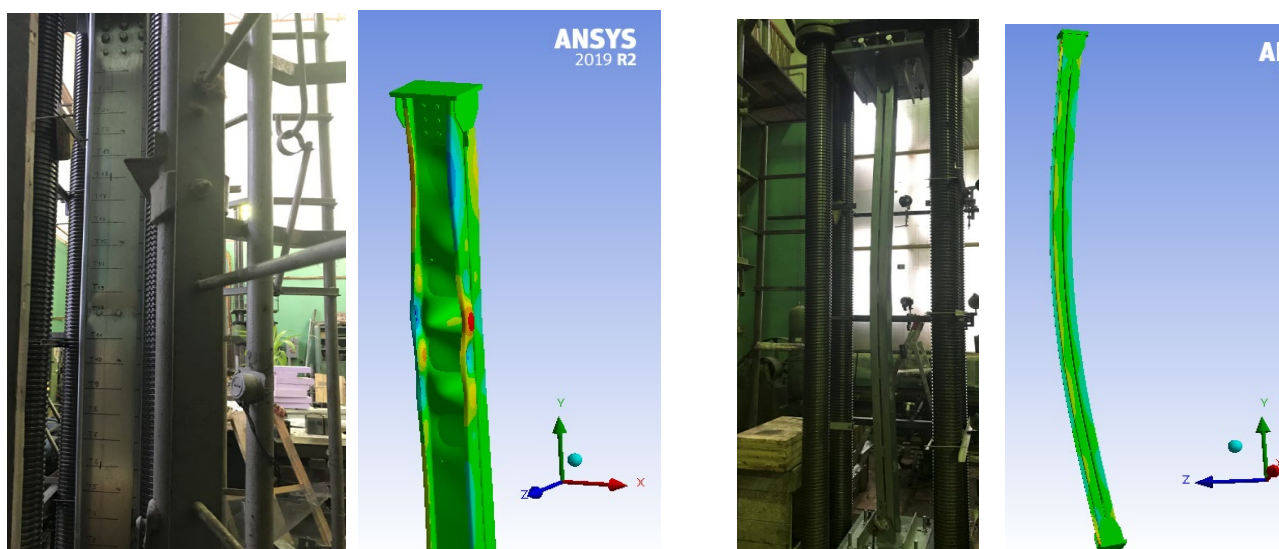


Рисунок 9 - Форма разрушения составной стойки

Установлено, что результаты экспериментальных и теоретических исследований согласуются между собой лишь частично. Поэтому существующая методика определения несущей способности составных стоек из холодногнутых оцинкованных С-образных профилей требует уточнения в части использования

коэффициентов условий работы, принятых в нормах проектирования.

Для выявления эффекта подкрепления холодногнутого оцинкованного профиля пенобетоном от потери местной устойчивости были проведены испытания нагружением холодногнутых оцинкованных профилей с заполнением пенобетоном неавтоклавного твердения плотностью в диапазоне от 300 кг/м^3 до 900 кг/м^3 (рисунок 10).

Опытные образцы тип №1 – фрагмент панели стены, выполненный из С-профилей $AC150 \times 45 \times 12 \times 1,6$ и заполненный пенобетоном $\rho = 250 \div 300 \text{ кг/м}^3$;

Опытные образцы тип №2 – фрагмент панели стены, выполненный из С-профилей $AC150 \times 45 \times 12 \times 1,6$ и заполненный пенобетоном $\rho = 550 \div 600 \text{ кг/м}^3$;

Опытные образцы тип №3 – фрагмент панели стены, выполненный из С-профилей $AC150 \times 45 \times 12 \times 1,6$ и заполненный пенобетоном $\rho = 850 \div 900 \text{ кг/м}^3$.

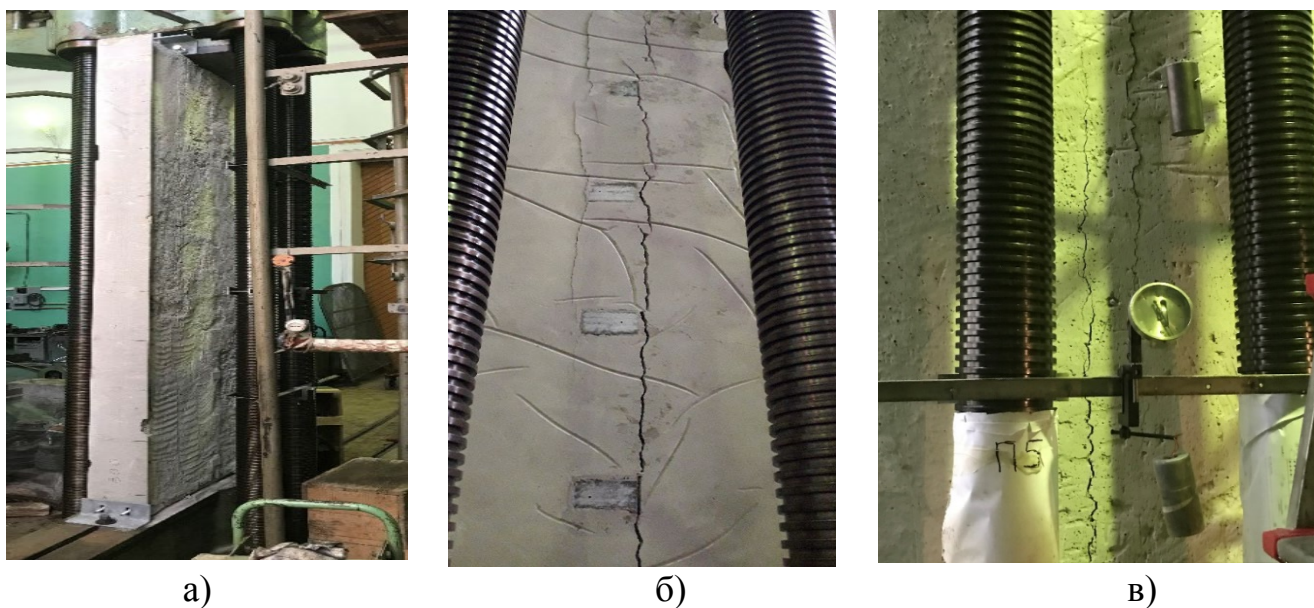


Рисунок 10 - Образца панели: а) закрепление на гидравлическом прессе МАН-500; б, в) образование трещин в пенобетоне в процессе нагружения образца

По результатам испытаний были получены: критические нагрузки, прогибы. Результаты испытаний сравнивались с нормативными расчетами в соответствии с СП 260.1325800, при этом учитывалось опирание образца на испытательный стенд: сплошное или точечное.

Сопоставление значений несущей способности, полученных численными методами и в ходе эксперимента представлены на рисунке 11.

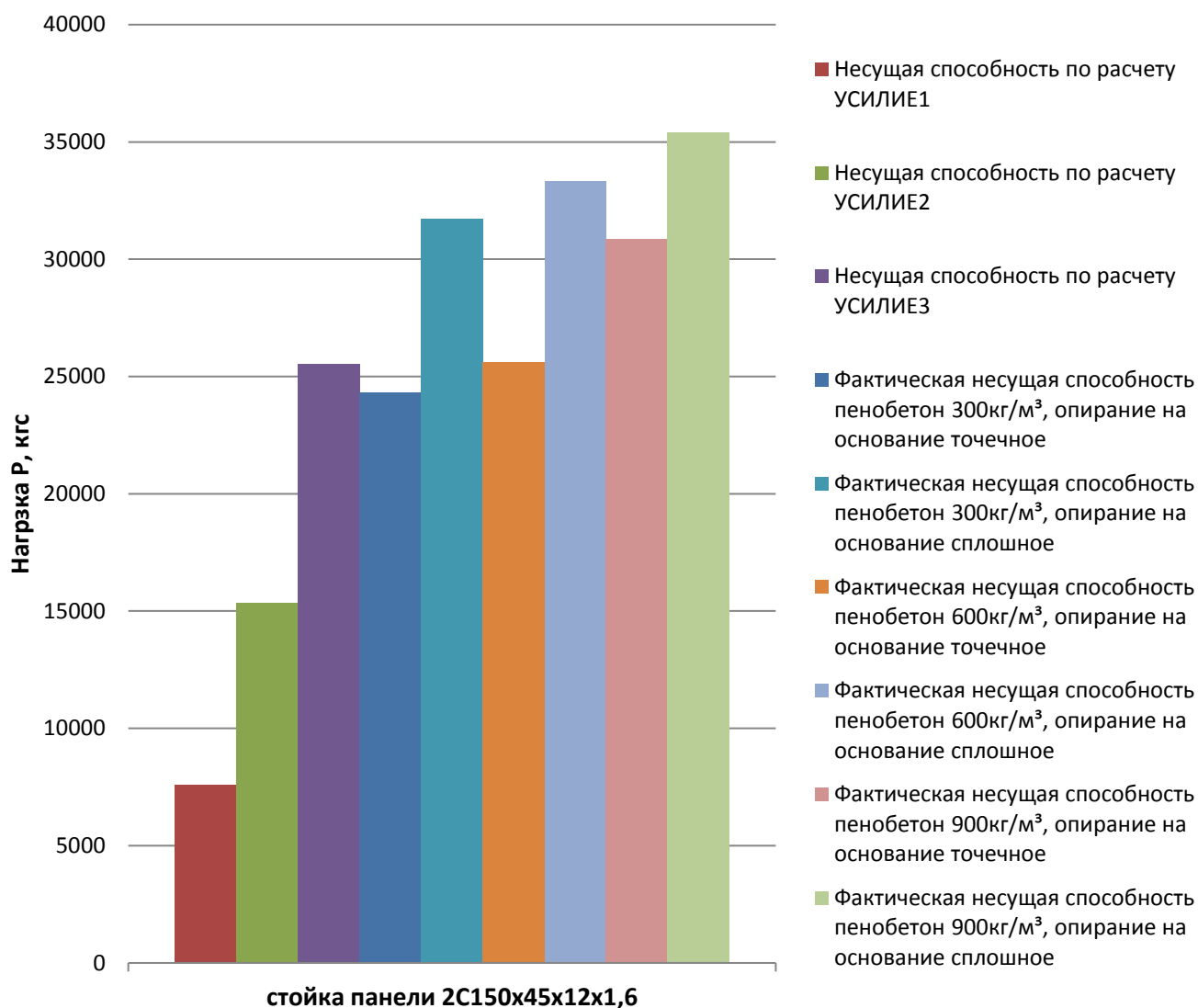


Рисунок 11 - Сравнение фактической несущей способности, полученной по результатам испытания, с расчетной несущей способностью стойки стеновой панели в зависимости от плотности заполняющего пенобетона

На основании полученных данных сделаны следующие выводы:

- несущая способность для стоек панелей с заполнением пенобетоном плотностью от 300 кг/м³ может быть определена численным методом без учета редуцирования сечения.

- при использовании в качестве наполнителя пенобетона плотностью от 600 кг/м³ наблюдается совместная работа оцинкованных профилей стойки и пенобетона.

В приложении 1 приводятся акты внедрения результатов работы.

В приложении 2 приводится патент на полезную модель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение несущих конструкций из гнутых оцинкованных профилей в сочетании с высокоэффективными современными теплоизолирующими материалом – пенобетоном - обеспечивает комплексную экономическую эффективность, высокую скорость и качество строительства объектов. Такие конструкции могут быть широко востребованы при возведении зданий общественного и жилого назначения. Область применения конструкций чрезвычайно велика.

2. Разработаны расчетные модели составных стоек (стержневая и конечно элементная), хорошо описывающие их действительную работу под нагрузкой.

3. Проведены экспериментальные исследования стоек из стальных холодногнутых С-образных профилей, в результате которых получены данные о напряженно деформированном состоянии конструкций. Определено, что частота скрепления профилей между собой согласно требований [48] не позволяет в полной мере считать профиль сплошностенчатым. Необходимо дополнительное понижение значения коэффициента условий работы γ_c до значения 0,9, что подтверждено моделированием в программном комплексе ANSYS.

4. Проведены экспериментальные исследования фрагментов стеновых панелей с каркасом из холодногнутых оцинкованных С-образных профилей и заполнением пенобетоном неавтоклавного твердения плотностью $300 \div 900 \text{ кг/м}^3$. Выявлен эффект подкрепления сечения стойки от потери местной устойчивости при использовании пенобетона низкой плотности (300 кг/м^3). При применении пенобетона средней и высокой плотности ($600 \div 900 \text{ кг/м}^3$) наблюдался эффект совместной работы стальных стоек каркаса панели и пенобетона, и связанное с ним повышение прочности, общей и местной устойчивости стоек относительно значений, полученных по результатам численных исследований и натурных

испытаний отдельно стоящих стоек с аналогичными размерами поперечного сечения.

5. Проведены исследования коррозии стальных оцинкованных конструкций в среде пенобетона, в ходе которых было показано, что конструкции, изготовленные из марки стали 350 с цинковым покрытием класса 275 толщиной не менее 19 мкм, устойчивы к коррозии и могут эксплуатироваться в среде пенобетона сроком более 50 лет.

6. Проведены пожарные испытания, определившие предел огнестойкости для конструкций стального каркаса из оцинкованных профилей с заполнением пенобетоном - REI90, что позволяет применять их в зданиях до 2-ой степени огнестойкости включительно.

7. Проведен тепловизионный контроль качества тепловой защиты построенного здания. На основе данного исследования сделан вывод о правильности принятых проектных решений, а также о должном уровне реализации этих решений при монтаже.

8. Разработаны рекомендации, а также система количественных критериев напряженно-деформированного состояния, определены величины предельно допустимых (критических) перемещений основных несущих конструкций и внедрена система мониторинга за конструкциями каркаса здания в процессе эксплуатации.

Рекомендациями и перспективами дальнейшей разработки темы могут являться:

- исследование более широкого диапазона профилей, как по форме сечения (Z , Ω , Σ и т.д), так и по соотношению толщины к высоте и ширине профиля, для составных стоек с целью получения уточненного коэффициента условий работы γ_c ;
- исследование несущих элементов стеновых панелей с заполнением пенобетоном средней и высокой плотности (от 600 кг/м^3 и выше) с целью изучения эффекта совместной работы и разработки методики расчета.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Авторские свидетельства и патенты

1. Патент РФ № 110108. Сталебетонное перекрытие. Авторы: Акопян А.Б., Нефедов Г.В., Шухардин А.А. // Бюл. изобр.— 2011.— №31.

Публикации в изданиях, включённых в перечень рецензируемых научных изданий по списку ВАК РФ

2. Нефедов, Г.В. Строительство домов средней этажности на каркасах из легких стальных конструкций / Г.В. Нефедов // Промышленное и гражданское строительство. — 2020. — №7. — С. 10–15.
3. Нефедов, Г.В. Испытание составных стоек из холодногнутых С-образных профилей / Г.В. Нефедов // Вестник НИЦ «Строительство». — 2020. — №2. — С. 106-116.

Публикации в других изданиях

4. Shukhardin, A. Fire Simulation of Light Gauge Steel Frame Wall System with Foam Concrete Filling/ A. Shukhardin, G. Nefedov, M. Gravit et al. // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. —2019. —P. 836-844.