ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ
МИНИСТЕРСТВА ПО ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ»

УДК 614.841.332

НГУЕН Тхань Киен

ОГНЕСТОЙКОСТЬ И ОГНЕСОХРАННОСТЬ СЖАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОКЛАВНЫХ АЭРИРОВАННЫХ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ БЛОКОВ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.26.03 –
пожарная и промышленная безопасность

Минск, 2016

Работа выполнена в Государственном учреждении образования «Командно-инженерный институт» МЧС Республики Беларусь

Научный руководитель: **Кудряшов Вадим Александрович**, кандидат технических наук, доцент, начальник отдела научной и инновационной деятельности Университета гражданской защиты МЧС Беларуси

Официальные оппоненты: **Батяновский Эдуард Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология бетона и строительные материалы» Белорусского национального технического университета

Дмитракович Николай Михайлович, кандидат технических наук, начальник кафедры управления защитой от чрезвычайных ситуаций Университета гражданской защиты МЧС Беларуси

Оппонирующая организация: Филиал РУП «Институт БелНИИС» – «Научно-технический центр», г.Брест

Защита состоится **11 ноября 2016 года** в 14:30 на заседании Совета по защите диссертаций К 11.01.01 в государственном учреждении образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь» по адресу: 220118 г. Минск, ул. Машиностроителей, 25, конференц-зал, тел. +375 (17) 341-32-99, e-mail: mail@kii.gov.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».

Автореферат разослан _____ 2016 г.

Исполняющий обязанности
ученого секретаря Совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент С.М.Пастухов

ВВЕДЕНИЕ

Автоклавный ячеистый газобетон – один из наиболее распространенных строительных материалов, широко применяемых в современное время в несущих и ограждающих конструкциях зданий. Экологичность, дешевизна, низкая плотность и теплопроводность в сочетании с достаточной прочностью и легкостью в обработке обеспечили указанному строительному материалу повсеместное применение. Миллионы кубических метров автоклавного ячеистого бетона ежегодно производятся и используются в строительстве зданий Беларуси и Вьетнама, обеспечивая комфортные условия для людей в сложных климатических условиях обеих стран. Ячеистый бетон известен как негорючий огнестойкий материал. Однако, при большом количестве результатов испытаний остается не решенным вопрос расчета его огнестойкости и огнесохранности. Это особенно актуально для Вьетнамской Социалистической Республики, где отсутствует специальное оборудование для испытаний конструкций в условиях пожара.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами. Диссертационные исследования легли в основу заявки на совместный конкурс научных проектов «БРФФИ-ВАНТ-2016», тема «Моделирование процесса теплопередачи и механики разрушения в пористых силикатных материалах при высокотемпературных воздействиях на основе данных экспериментальных исследований». В настоящее время проходит экспертиза заявочной документации в Национальной академии наук Беларуси и Вьетнамской академии наук и технологий, планируемые сроки выполнения – 01.01.2017-30.12.2018.

Цель и задачи исследования

Цель работы – обеспечить пожарную безопасность сжатых стеновых конструкций из автоклавных ячеистых бетонных блоков путем разработки методики расчета их огнестойкости при пожаре и огнесохранности после пожара, на основе экспериментальных данных, включающих диаграммы деформирования, закономерности процесса теплопередачи и усадки бетона при высокотемпературном нагреве.

Для достижения поставленной цели решены следующие *задачи*:

1. Разработать методику и выполнить лабораторные исследования при высокотемпературном нагреве образцов из автоклавных ячеистых бетонных блоков, получить диаграммы деформирования в сжатом и растянутом напряженном состоянии, закономерности процесса теплопередачи и усадки бетона при высокотемпературном нагреве.

2. Разработать методику и выполнить натурные огневые испытания тонкостенных конструкций из автоклавных ячеистых бетонных блоков. Установить конструктивные особенности, определяющие механизм разрушения исследуемых конструкций при пожаре.

3. Разработать методику расчета огнестойкости и огнесохранности стеновых конструкций из автоклавных ячеистых бетонных блоков в случае пожара, а также рекомендации по огнестойкому конструированию.

Научная новизна

Проведены лабораторные и натурные огневые испытания, получены новые экспериментальные данные: диаграмм деформирования газобетона в сжатом и растянутом напряженном состоянии, моделирования процесса теплопередачи в граничном к пожару слое газобетона, закономерности тепловой усадки газобетона, структурных изменений в газобетоне в процессе нагрева, а также данные по изменению температуры на необогреваемой стороне и повреждений конструкций, полученных при пожаре. Разработана методика расчета огнестойкости и огнесохранности сжатых стеновых конструкций из автоклавных ячеистых бетонных блоков, отличающаяся от существующих возможностью учета деформаций усадки и использования критической температуры 350 °С для перегородок и 750 °С для несущих стен.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика и результаты лабораторных исследований при высокотемпературном нагреве, включающие новые экспериментальные данные: диаграмм деформирования газобетона в сжатом и растянутом напряженном состоянии, моделирования процесса теплопередачи в граничном к пожару слое газобетона, закономерности тепловой усадки газобетона, структурных изменений в газобетоне в процессе нагрева.

2. Методика и результаты натурных огневых испытаний тонкостенных конструкций из автоклавных ячеистых бетонных блоков, включающие новые экспериментальные данные: по изменению температуры на необогреваемой стороне и повреждений конструкций, полученных при пожаре; позволившие сформулировать конструктивные требования к огнестойким и огнесохранным конструкциям из автоклавных ячеистых бетонных блоков.

3. Методика расчета огнестойкости и огнесохранности сжатых стеновых конструкций из автоклавных ячеистых бетонных блоков, отличающаяся от существующих возможностью учета деформаций усадки и использования критической температуры 350 °С для перегородок и 750 °С для несущих стен.

Личный вклад соискателя. Самостоятельно выполнены работы по подготовке и проведению испытаний образцов-призм, образцов-пластин, а также возведению тонкостенных конструкций для натурных огневых испытаний,

замеры во всех испытаниях, обработка и анализ результатов испытаний, теоретические исследования механизма разрушения и напряженно-деформированного состояния конструкций, сформулированы предложения по расчету и конструированию (включая методику расчета огнестойкости и огнесохранности, предложения в деятельность по пожарной профилактике, в проектную документацию и в образовательный процесс). Цель и задачи исследований сформулированы совместно с научным руководителем – канд. техн. наук В.А. Кудряшовым. Совместно с С.М. Жамойдиком, А.Е. Лупандиным, А.С. Дробышем, С.С. Ботяном и научным руководителем проведены экспериментальные исследования. Совместно с канд. физ.-мат. наук А.В. Ширко и А.Е. Лупандиным проведено численное моделирование прогрева. Совместно с канд. техн. наук И.И. Полеводой, канд. техн. наук В.Е. Бабичем, канд. техн. наук С.М. Пастуховым, С.М. Жамойдиком, А.С. Дробышем и научным руководителем подготовлена заявка и получен патент на полезную модель «Стенд для испытаний строительных конструкций на огнестойкость» № 10911 от 28.02.2016.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах: VI-X междунар. науч.-практ. конф. курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) «Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы», (г.Минск, 5-7 апреля 2012 г.); (4-5 апреля 2013 г.); (3-4 апреля 2014 г.); (2-3 апреля 2015 г.); (7-8 апреля 2016 г.); междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные технологии защиты от чрезвычайных ситуаций» (г.Минск, 26-27 сентября 2013 г.); междунар. конф. молодых ученых «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций» (г.Минск, 28 ноября 2013 г.).

Опубликованность результатов диссертации. Основные положения диссертации опубликованы в 11 печатных работах, в том числе: 4 статьи, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом 3,06 авторских листа, 7 тезисов докладов в сборниках научных трудов международных конференций, 1 патенте на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка из 115 наименований, включая собственные публикации, 5 приложений, 68 рисунков и 13 таблиц. Полный объем диссертации составляет 141 страницу. Объем, занимаемый иллюстрациями, таблицами, приложениями, составляет 56 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена особенностям автоклавного ячеистого бетона как строительного материала, методам расчета и конструктивным решениям с применением ячеистобетонных блоков, а также проблемам их огнестойкости при пожаре и огнесохранности после пожара.

В развитие теории производства, конструирования и расчета сжатых конструкций с применением автоклавных ячеистобетонных блоков значительный вклад внесли В.Л. Бильдюкевич, В.Л. Вылежагин, С.Л. Галкин, В.Н. Деркач, М.Я. Кривицкий, Н.И. Левин, В.В. Макаричев, К.М. Милейковская, Я.М. Паплавскис, В.А. Пинскер, Н.П. Сажнев, Е.С. Силаенков, П.П. Ткачик, и др.

Теория огнестойкости и огнесохранности бетонов основана на работах Б.Т. Беловешкина, Ф.Е. Гитмана, З.Д. Затуловского, С.Ф. Клованича, Е.В. Консевы, И.С. Кузнецовой, В.Е. Левитского, А.Ф. Милованова, И.И. Полеводы, А.В. Пчелинцева, М.Я. Ройтмана, В.М. Ройтмана, В.В. Соломонова, С.Л. Фомина, А.И. Яковлева и др.

Огнестойкость – это способность строительных конструкций выполнять несущие и ограждающие функции при пожаре. За огнесохранность конструкции принимают такое ее состояние, при котором остаточная прочность или необратимые деформации обеспечивают надежную работу после пожара. Таким образом, огнестойкость и огнесохранность – ключевые характеристики в области пожарной безопасности, обеспечивающие «сохранение сооружения от разрушения и выполнения средствами противопожарной защиты и пожаротушения своих функций» (ТР 2013/BY). Данное положение характерно для многих стран, в том числе Беларуси и Вьетнама.

Вместе с высокими эксплуатационными характеристиками, автоклавный ячеистый бетон является неорганическим негорючим материалом, обладающим высокой сопротивляемостью огневому воздействию. В Республике Беларусь имеются ограниченные данные по результатам испытаний огнестойкости конструкций с применением автоклавных ячеистобетонных блоков толщиной 300…400 мм, показывающих пределы огнестойкости 90…150 минут и более. Однако распространить их на всю номенклатуру изделий, в том числе толщиной 120…300 мм, не представляется возможным. При высокой огнестойкости вопрос огнесохранности для конструкций имеет бóльшее значение, однако эта область в настоящее время является наименее изученной, в том числе и для ячеистых бетонов.

В Республике Беларусь действует ряд гармонизированных европейских стандартов, таких как ТКП EN 1996-1-2 и СТБ EN 12602, включающих аналитические методики по оценке огнестойкости конструкций из автоклавных ячеистых бетонов. Представленные методики несколько идеализированы и не позволяют сделать однозначный вывод об огнесохранности конструкций. Вопрос учета в расчете повышенной прочности конструкции в слоях, нагретых от 200 до 700 °С требует детального изучения и экспериментального обоснования. Немаловажным является также и то, что свойства автоклавных ячеистых бетонов весьма чувствительны к особенностям технологического производства, к составам и качеству исходных компонентов.

Обзор литературных источников и технических нормативных правовых актов показал, что автоклавные ячеистобетонные блоки являются эффективными строительными материалами, для оценки огнестойкости и огнесохранности которых необходимо проведение лабораторных и натурных огневых испытаний, разработки методики расчета и рекомендаций конструированию.

Во второй главе изложены методика и результаты лабораторных исследований.

Целью экспериментальных исследований являлась разработка методики расчета огнестойкости и огнесохранности конструкций из автоклавных ячеистых блоков на основе диаграмм деформирования в сжатом и растянутом напряженном состоянии, а также структурных и теплофизических характеристик исследуемого материала. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведены исследования прочности образцов автоклавного ячеистого бетона в диапазоне температур 20…1000 °С и получены необходимые данные для построения диаграмм деформирования в сжатом и растянутом напряженном состоянии с учетом результатов статистической обработки экспериментов.

2. Проведены термогравиметрические, спектральные и тепловые исследования образцов автоклавного ячеистого бетона и получены данные по изменению плотности материала, усадке, а также о фазовых и физико-химических процессах, протекающих в структуре материала при нагреве.

3. Проведено тепловое моделирование граничных к пожару слоев ячеистого бетона и получены данные для верификации расчетных моделей прогрева и теплофизических характеристик.

В качестве основы для оценки прочностных характеристик и построения диаграмм деформирования при нагреве принята методика по ГОСТ 24452 с учетом положений ГОСТ 10180. Ввиду отсутствия дорогостоящего оборудования, особенностей изучаемого материала, а также с целью более подробного изучения его физико-механических характеристик после нагрева, испытания образцов проводили с раздельным нагревом до заданной температуры, охлаждением и

последующим испытанием на автоматической сжимающе-разрывной испытательной машине.

Для испытаний при содействии ОАО «Управляющая компания холдинга «Забудова» было подготовлено 32 образца призм из автоклавного ячеистого бетона класса по прочности на сжатие B2,5, марки по средней плотности D500 согласно СТБ 1117 с усредненными размерами 70×70×280 мм. Фактическая плотность образцов составляла 566±20 кг/м^3. Размеры образцов были обусловлены ограничениями внутреннего пространства имеющейся камерной печи. План проведения эксперимента предусматривал 8 серий испытаний (по 4 образца в каждой) и включал испытания ненагреваемых и нагреваемых (с шагом в 200 °C) образцов при сжатии и изгибе. Все образцы были изготовлены в ноябре 2014 года и кондиционировались при нормальных условиях полтора года при температуре 20±5 °C и относительной влажности 50±10 %.

Ввиду высокой пористости изучаемого материала, стандартные испытания по оценке теплофизических свойств были дополнены модельными испытаниями по прогреву образцов-пластин с усредненными размерами 210×210×10(20) мм при одностороннем нестационарном тепловом потоке и максимальной теплоизоляцией необогреваемой стороны с фиксацией изменения температуры.

Для исключения преждевременного разрушения образцов-призм от неравномерных температурных деформаций усадки, их нагрев производили ступенчато, с нарастающим периодом нагревания и длительной выдержкой на заключительном этапе нагревания. Средняя скорость нагрева образцов составила приблизительно 30 градусов в минуту. Это ниже скорости роста стандартного пожара, но соответствует средней скорости прогрева граничного обогреваемого слоя ячеистого бетона толщиной 10 мм. Обобщенный график нагрева с усредненными данными температур между верхней, нижней поверхностью и центром образцов-призм по результатам статистической обработки представлен на рисунке 1. Охлаждение образцов проводили в закрытой печи по инерционному режиму, но не менее 12 часов до температуры 30±10 °C. Скорость охлаждения образцов-призм контролировали, не допуская превышения скорости нагрева.

Измерение массы и размеров образцов на всех этапах испытаний позволили выявить зависимости изменения кажущейся плотности и усадки ячеистого бетона при нагреве до высоких температур и последующего охлаждения. Как показано на рисунке 2, для массы, плотности, объема и размеров выявлены линейные зависимости изменения от температуры нагрева. Для ячеистых бетонов характерен достаточно высокий коэффициент температурной усадки, составляющий 0,0015 %/°C либо 0,015 мм/(м·°C).

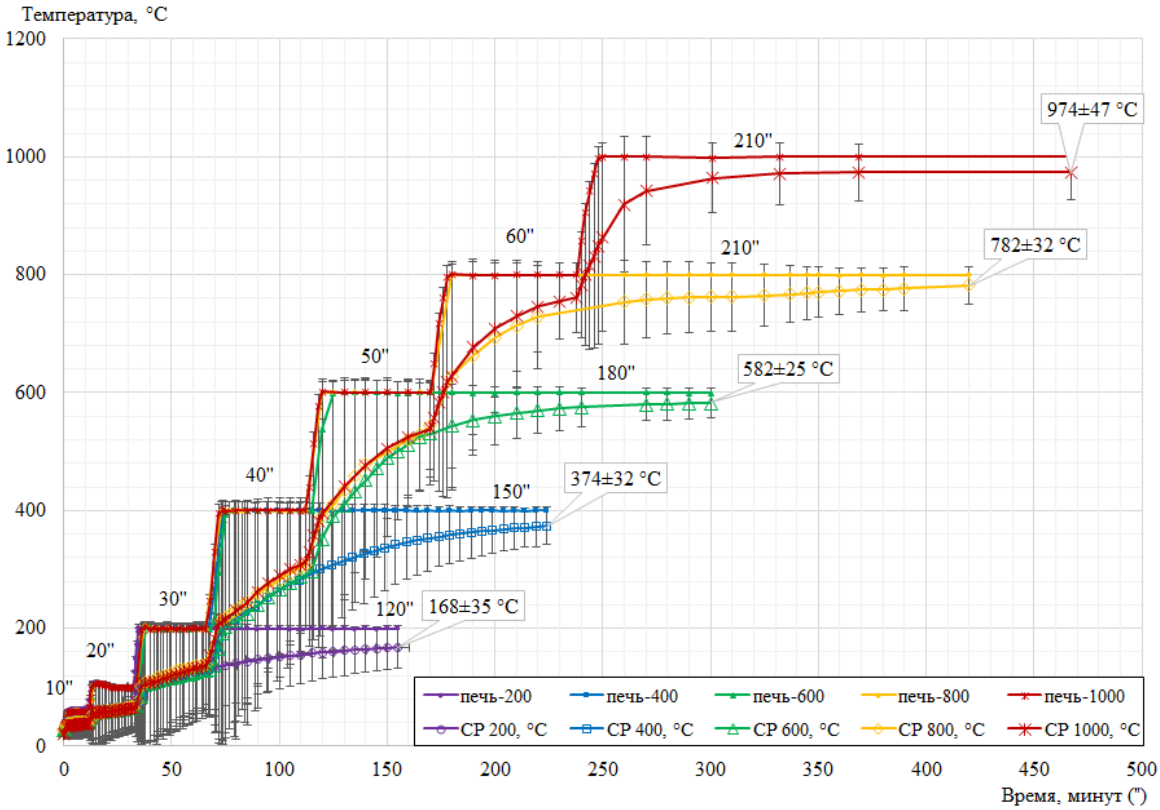


Рисунок 1. – Режим нагрева экспериментальных образцов-призм

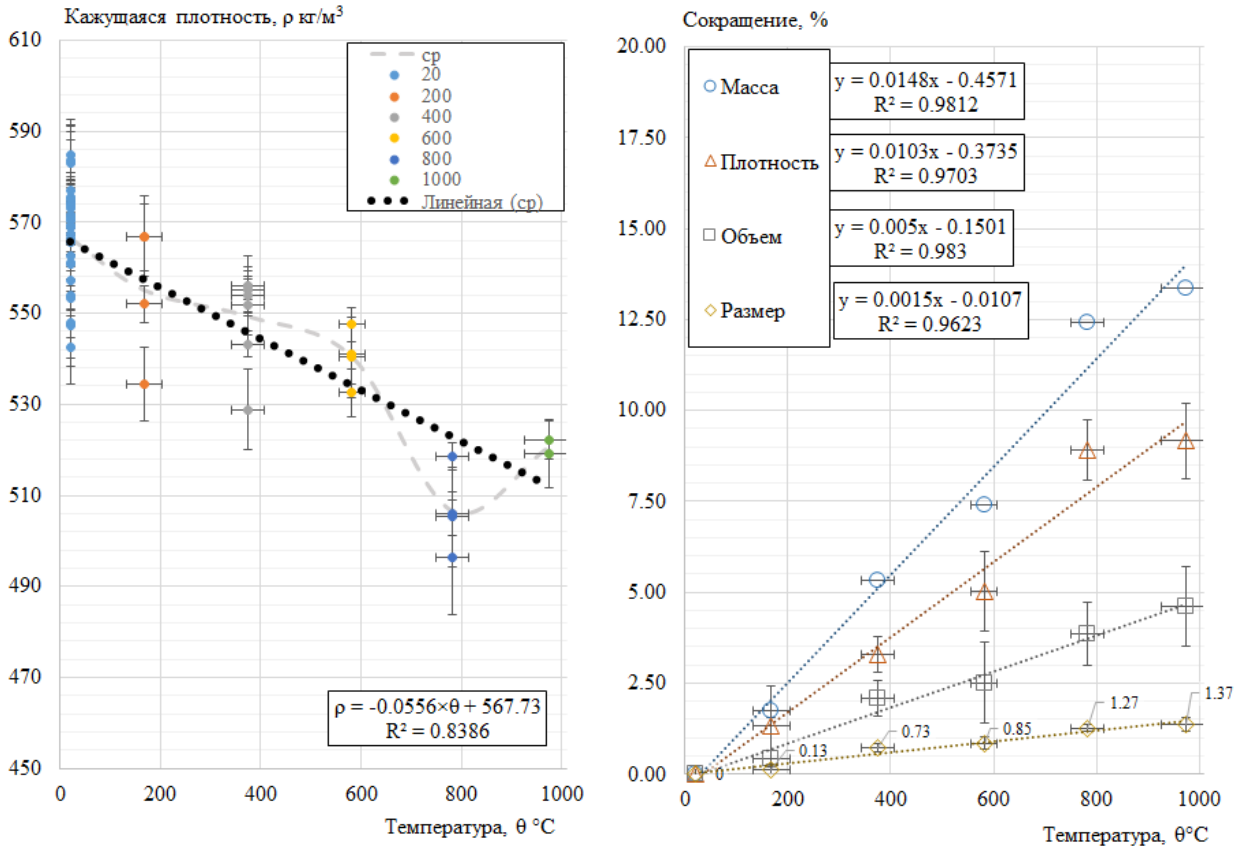


Рисунок 2. – Характер изменения кажущейся плотности и относительного сокращения массовых и размерных характеристик ячеистого бетона при усадке

Дифференциально-термический и термогравиметрический анализ показал, что для ячеистого бетона массовая и объемная усадка до температур 300…400 °С вызвана прежде всего удалением адсорбированной поровой воды. Для диапазона температур 600…900 °С характерны структурные преобразования, сопровождающиеся эндотермическими и экзотермическими эффектами (рисунок 3).

Дифрактограммы образцов ячеистого бетона после прочностных испытаний (для всех ступеней нагрева), показали, что фазовый состав при нагреве претерпевает существенные изменения. И если в начальных условиях и вплоть до 350…400 °С основными структурообразующими минералами являлись кальцит $CaCO_3$ и тоберморит-11Å $Ca_5(OH)_2Si_6O_{16}\cdot 4H_2O$, то после прогрева при температурах, близких к 1000 °С, преобладает минерал волластонит-2М $CaSiO_3$. О кристаллизации волластонита, образовавшегося при дегидратации тоберморита свидетельствует экзотермический эффект при температуре 828°С (рисунок 3). Как отмечают отдельные исследователи, именно тоберморит обеспечивает высокую прочность межпоровых перегородок ячеистого бетона, а соответственно и прочность материала в целом.

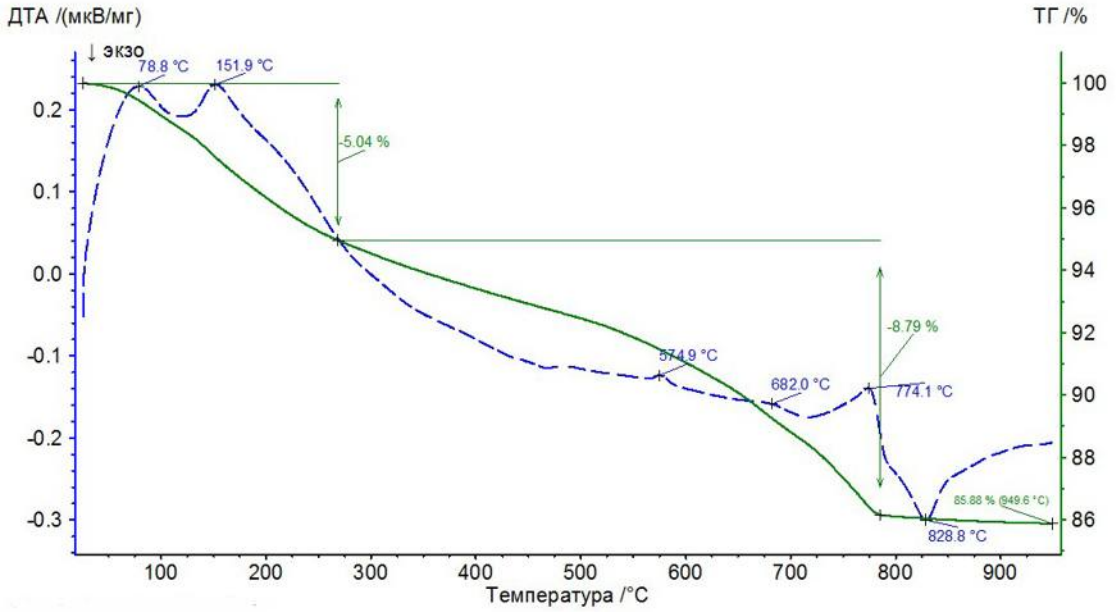


Рисунок 3. – Результаты дифференциально-термического и термогравиметрического анализа образцов автоклавного ячеистого бетона

Сущность прочностных испытаний заключалась в сжатии образцов-призм, прошедших тепловой нагрев, вдоль продольной оси до разрушения. Для оценки разрывной прочности при изгибе образцы-призмы устанавливали на линейные шарнирные опоры и прикладывали сосредоточенную нагрузку в середине вплоть до разрушения.

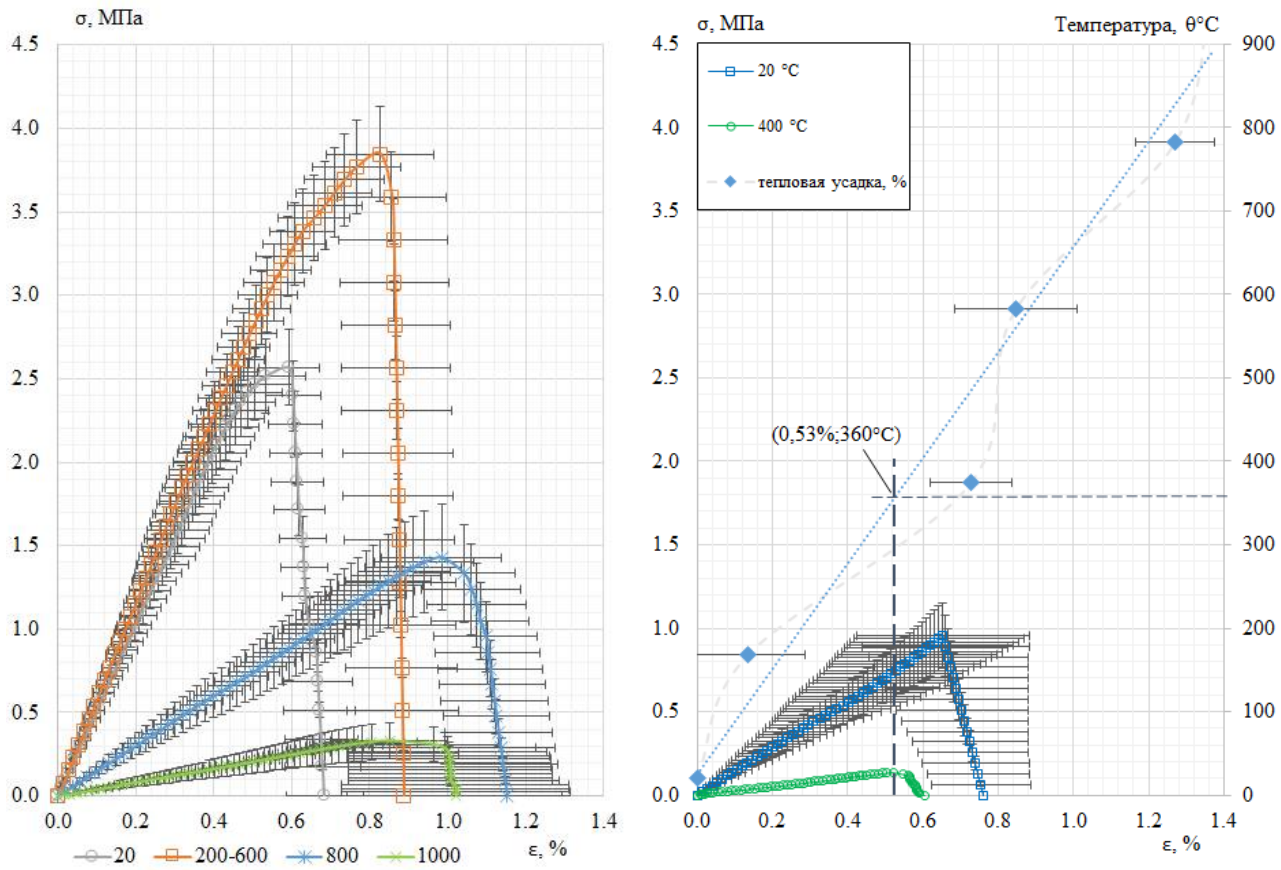
Процесс прочностных испытаний сопровождался синхронным построением диаграммы деформирования (Н – мм) испытательной машиной. Ввиду отсутствия дорогостоящего оборудования в виде индикаторов деформаций, деформации образцов во время испытаний фиксировали по данным перемещения траверсы испытательной машины. Статистическая обработка диаграмм деформирования проведена на основе среднего арифметического координат напряжений и деформаций, соответствующих равным долям напряжений от пикового значения.

Выявлено, что прочность и предельные относительные деформации автоклавного ячеистого бетона в диапазоне температур от 200 до 600 °С (соответствует диапазону от 168±35 до 582±25 °С согласно режиму нагрева) выше в 1,5 раза по сравнению с исходными образцами. Прочность и деформации в указанном диапазоне температур изменяются незначительно, и с точностью ±15 % могут быть обобщены (рисунок 4а). Для диапазона температур 800…1000 °С (соответствует диапазону от 782±32 до 974±47 °С согласно режиму нагрева) характерно существенное снижение прочности и увеличение предельных деформаций сжатия, что полностью соответствует данным термогравиметрического и рентгенографического исследований.

Результаты испытаний образцов-призм на растяжение при изгибе (рисунок 4б) показали прочность исходных образцов-призм и образцов-призм, предварительно нагреваемых до температуры 400 °С (соответствует 374±32 °С согласно режиму нагрева), равную в среднем, соответственно, 0,96 МПа и 0,14 МПа. При этом для нагреваемых блоков характерен значительный разброс прочности от 0,03 до 0,31 МПа (на рисунке 4б приведено только среднее значение), что вызвано наличием усадочных трещин, несмотря на принятые предосторожности в режиме нагрева. Очевидно, что для более высоких температур нагрева, прочность ячеистого бетона на растяжение стремится к нулю.

При сопоставлении деформаций усадки (температурная шкала) и растяжения (шкала напряжений) на рисунке 4б (растяжение) выявлено, что для ячеистого бетона, нагретого до температур выше 360 °С есть высокая вероятность образования усадочных трещин. Это особенно характерно для ненесущих перегородок, в которых отсутствуют компенсирующие напряжения сжатия.

Результаты теплового моделирования в камерной электропечи образцов-пластин толщиной 10 и 20 мм при тепловом режиме, близком к стандартному, и идеальной теплоизоляции с тыльной стороны позволили уточнить данные прогрева граничных обогреваемых слоев конструкций автоклавного ячеистого бетона, наиболее подверженных повреждениям в результате нагрева (рисунок 5).



а) Сжатие б) Растяжение

Температуры соответствуют режиму нагрева образцов согласно рисунку 1.

Рисунок 4. – Диаграммы деформирования ячеистого бетона при нагреве

Таблица 1. – Обобщенные параметры диаграмм деформирования

Θ, °C	f_{ck}, МПа	$k_{c,t}$	$\beta_{c,t}$	$\varepsilon_{c1,t}$, %	$\varepsilon_{cu,t}$, %
20	2,57	1,00	1,00	0,593	0,684
168±35…582±25	3,85	1,50	1,11	0,827	0,887
782±32	1,43	0,56	0,29	0,985	1,153
974±47	0,33	0,13	0,08	0,851	1,021

Примечание: f_{ck} – пиковое значение напряжений (прочность), МПа; $k_{c,t}$ – коэффициент снижения прочности при нагреве; $\varepsilon_{c1,t}$ и $\varepsilon_{cu,t}$ – соответственно, значения пиковой и предельной деформации, %.

Температуру граничных обогреваемых слоев с достаточной точностью можно определять по классической формуле для железобетона, с использованием усредненных теплофизических характеристик (см. рисунок 5):

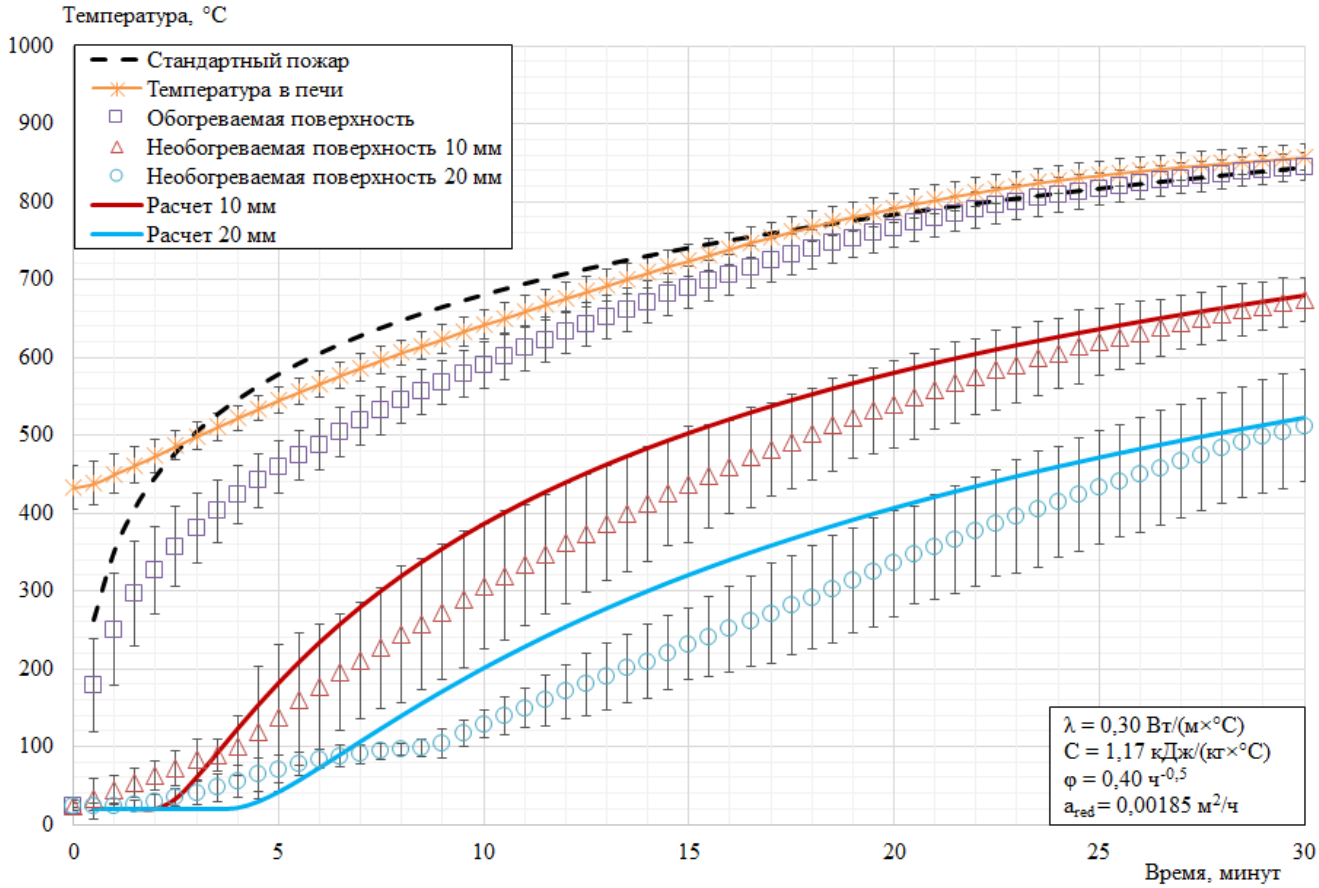


Рисунок 5. – Сопоставление теплового моделирования с расчетом по формуле (1)

$$q = 20 + 1200\left(1 - \frac{x_i + \varphi \times \sqrt{a_{red}}}{\sqrt{0{,}2 \times a_{red} \times t}}\right) \qquad a_{red} = \frac{3{,}6\lambda}{\rho \times C}, \tag{1}$$

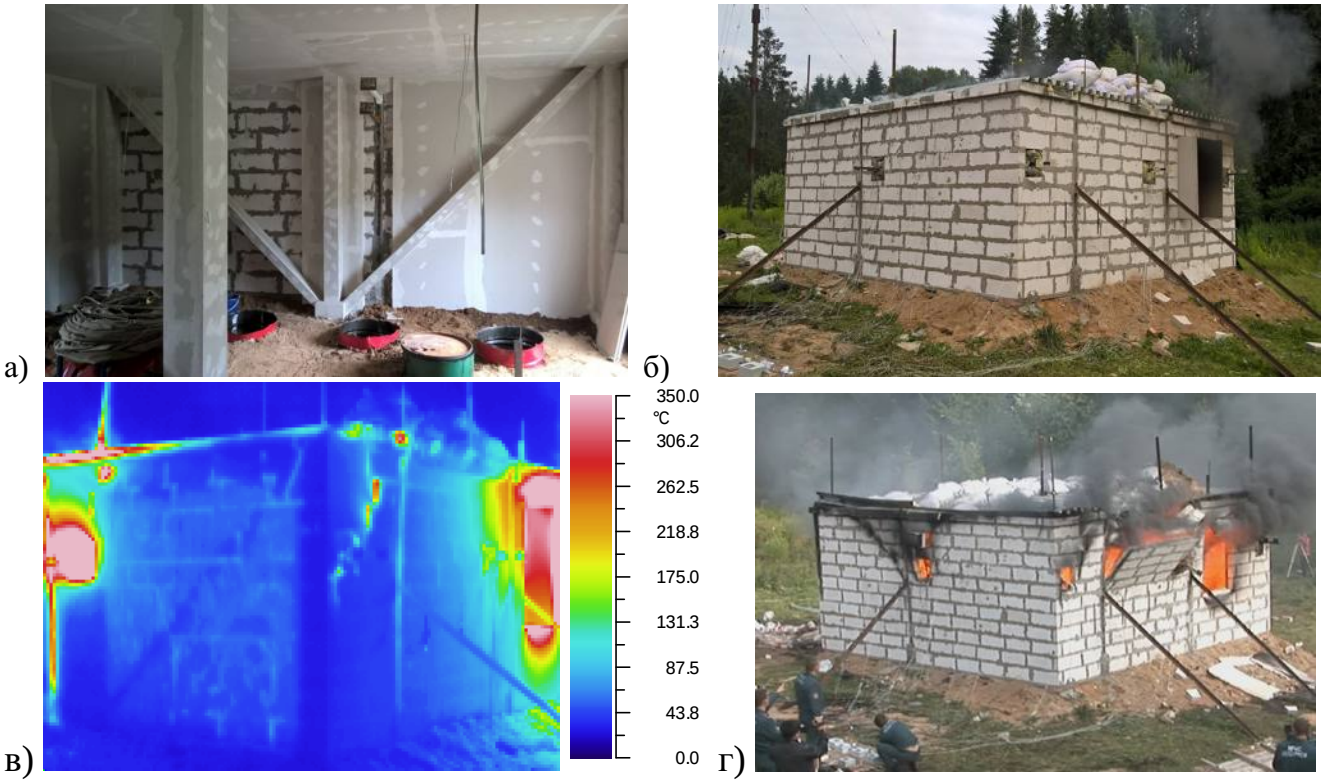
где x_i – толщина i-го слоя, м; φ – расчетный коэффициент, ч$^{-0,5}$; a_{red} – коэффициент температуропроводности, м^2/ч; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); C – удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С); a_{red} – коэффициент температуропроводности бетона, м^2/ч; ρ – плотность, кг/м^3.

В третьей главе представлены методика и результаты натурных огневых испытаний тонкостенных конструкций из автоклавных газобетонных блоков.

Для оценки огнестойкости реальных конструкций, выполненных из автоклавного ячеистого бетона, было проведены натурные огневые испытания фрагмента конструктивной системы на основе стального каркаса с использованием плитных огнезащитных материалов. Ячеистые блоки в указанном эксперименте играли роль огневой камеры. Основная задача при проектировании фрагмента состояла в том, чтобы конструкции ячеистобетонных стен выдержали не менее 60 минут огневого воздействия, близкого к стандартному. При проектировании ограждающих конструкций было принято решение использовать наиболее тонкие перегородочные блоки толщиной 120 мм. Такая перегородка

представляет особый интерес, т.к. в зависимости от условий применения ее огнестойкость может сильно различаться (см. ТКП EN 1996-1-2).

Для исключения взаимного влияния при перемещениях, стены и стойки стального каркаса были запроектированы на удалении не менее 200 мм друг от друга. Для возведения стен на основании столбчатых монолитных фундаментов были установлены железобетонные ростверки размерами 150×150 мм каждый на утрамбованной песчаной подушке. При строительстве были использованы ячеистобетонные блоки автоклавного твердения Минского комбината силикатных изделий марки 2,5-500-3,5-1 по СТБ 1117, размерами 625×120×249 мм (длина×ширина×высота). Ввиду того, что стены (перегородки) не были сопряжены с несущим каркасом, для обеспечения их устойчивости было применено решение, предусматривающее включение элементов жесткости в виде двутаврового профиля № 12 по ГОСТ 8239 в пределах толщины стены, каждый длиной 3,0 м, раскрепленных в середине раскосами (рисунок 6).



а) изнутри до начала испытаний; б) в начале испытаний;
в) в ходе испытаний (тепловизор); г) в момент разрушения стального каркаса

Рисунок 6. – Общий вид экспериментального фрагмента и натурных огневых испытаний

Сущность методики испытаний заключалась в изучении поведения и огнестойкости комплекса взаимосвязанных конструктивных элементов при сжигании реальной пожарной нагрузки (около трех с половиной тонн масла и древесины) до полного разрушения. В ходе экспериментальных исследований производили замер температуры внутри фрагмента, на обогреваемой и

необогреваемой стороне стен, в иных контрольных точках, фиксировались все факторы, влияющие на поведение и повреждение конструкций при пожаре.

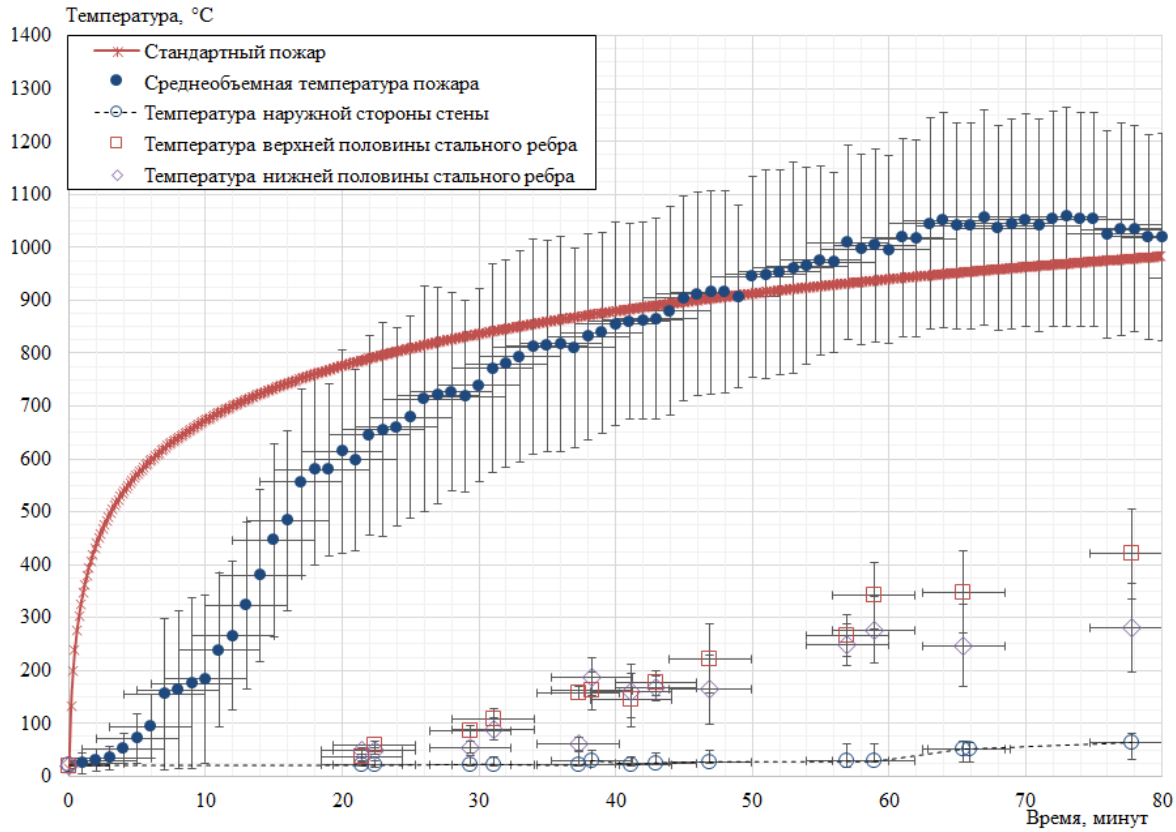


Рисунок 7. – Прогрев незащищенной стены из ячеистобетонных блоков

В результате испытаний установлено, что конструктивные решения на основе ячеистобетонных блоков с включением стальных элементов жесткости не являются огнестойкими при пожаре. Даже незначительное повышение температуры стали до температур 100…200 °С (в том числе с огнезащитой) приводят к возникновению разрушительного теплового момента.

Участок стены без огнезащиты (см рисунки 6в, 7) прогрелся до температуры не выше 85 °С, что соответствует пределу огнестойкости EI 60. После охлаждения со стороны нагрева было зафиксировано значительное количество усадочных трещин, хаотично ориентированных, что существенно снизило устойчивость стены и свидетельствует о недостаточной ее огнесохранности.

Четвертая глава посвящена анализу результатов экспериментальных исследований и разработке предложений по теоретической оценке пределов огнестойкости и огнесохранности конструкций с применением автоклавных ячеистобетонных блоков.

Проведенные исследования позволили сформулировать упрощенную методику расчета огнестойкости и огнесохранности кладки из ячеистых бетонных блоков:

1. Решить теплотехническую задачу прогрева сечения (для огнесохранности – с учетом стадии охлаждения) и определить расположение изотерм максимальных температур в сечении с шагом 50 градусов.

2. Для каждого слоя по формуле (2) и данных рисунка 4 провести оценку суммарных деформаций сжатия и усадки.

$$\varepsilon^{(tot)} = \varepsilon_s(\sigma, T) + \varepsilon_{th}(T), \tag{2}$$

где $\varepsilon^{(tot)}$ – суммарные деформации, %; ε_σ – силовые деформации, %; ε_{th} – температурные деформации, %; T – температура, °С; σ – напряжение, МПа.

2.1. В случае, если суммарные деформации соответствуют знаку растяжения, и он нагрет выше 350 °С, в этом слое высока вероятность образования усадочных трещин и его не следует учитывать в расчете прочности и устойчивости.

2.2. Если условие п.2.1. не выполняется и все слои находятся в сжатом состоянии, следует определить слои, нагретые выше температуры 750 °С. С учетом низкой прочности и большей деформативности их не следует учитывать в расчете прочности и устойчивости.

3. Общую оценку сжатого сечения следует определять по классической формуле (3) с площадью поперечного сечения, уменьшенной на основании п.2.1 либо 2.2. Повышением прочности при температурах 200…600 °С следует пренебречь, так как повышенное сопротивление обеспечивается при более высоких деформациях по сравнению с холодными слоями.

$$N_{Rd,q} = \Phi \times f_d \times A_\varepsilon . \tag{3}$$

где $N_{Rd,\theta}$ – прочность кладки, Н; Φ – коэффициент уменьшения сопротивления стены сжатию (потери устойчивости); f_d – расчетное сопротивление кладки при нормальных условиях, МПа; A_ε – площадь сечения кладки, за вычетом слоев, прогретых выше критических температур, м^2.

Результаты расчета по предложенной методике дают удовлетворительную сходимость с имеющимися экспериментальными данными (протокол НИИ ПБиЧС МЧС Беларуси № 52/738П от 12.04.2006). Стена из ячеистобетонных блоков В1,5 толщиной 400 мм, высотой 3100 мм, эксцентриситетом приложения нагрузки 80 мм. Через 150 минут стандартного огневого воздействия изотерма 750 °С будет располагаться на расстоянии 75 мм (определено по формуле 1). При коэффициенте уменьшения сопротивления стены сжатию (потери устойчивости), равным 0,55, указанная стена сможет выдержать нагрузку 330 кН/м, что выше испытательной, равной 67,7 кН/м. Предел огнестойкости REI 150 обеспечен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана методика лабораторных исследований при высокотемпературном нагреве образцов из автоклавных ячеистых бетонных блоков, включающая раздельный длительный нагрев в камерной электропечи при постоянной температуре и последующее испытание на прочность при сжатии (растяжение при изгибе) до разрушения, оценку закономерностей процесса теплопередачи, усадки и структурных изменений газобетона при высокотемпературном нагреве [2, 3].

2. Получены диаграммы деформирования в сжатом и растянутом напряженном состоянии при нагреве до температуры 1000 °С. Выявлено, что прочность и предельные относительные деформации сжатия газобетона в диапазоне температур от 168±35 до 582±25 °С изменяются незначительно, и с точностью ±15 % могут быть обобщены. Для диапазона температур от 782±32 до 974±47 °С характерно существенное снижение прочности и увеличение предельных деформаций сжатия, связанное с дегидратацией тоберморита и кристаллизацией волластонита [2].

3. Определены зависимости снижения плотности и усадки газобетона при нагреве. При сопоставлении деформаций усадки и растяжения выявлено, что для ячеистого бетона, нагретого до температур выше 360 °С существует вероятность образования усадочных трещин. Это особенно характерно для ненесущих перегородок, в которых отсутствуют компенсирующие напряжения сжатия [2, 3].

4. Толщину слоев, прогретых до критических температур, с достаточной точностью можно определять по классической формуле для железобетона, с использованием усредненных теплофизических характеристик, что подтверждено результатами теплового моделирования [1, 3].

5. Разработана методика натурных огневых испытаний, включающая проектное решение тонкостенных конструкций из ячеистых блоков, режим нагрева и способы контроля. В результате испытаний установлено, что стена без огнезащиты прогрелась до температуры не выше 85 °С, что соответствует пределу огнестойкости EI 60, при этом ее огнесохранность не была обеспечена ввиду развитых по глубине усадочных трещин [2, 4].

6. Предложена расчетная методика оценки огнестойкости и огнесохранности кладки из автоклавных ячеистых бетонных блоков, с учетом деформаций усадки и использования критических температур 350 °С для перегородок и 750 °С для несущих стен. Конструктивные решения на основе ячеистобетонных блоков с включением стальных элементов жесткости не являются огнестойкими при пожаре [2].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанная методика лабораторных и натурных экспериментальных исследований по оценке параметров, влияющих на огнестойкость и огнесохранность конструкций с применением ячеистых блоков может быть использована для других конструктивных решений, включающих иные виды бетонов и особенности обеспечения устойчивости кладки.

2. Расчет пределов огнестойкости при пожаре и огнесохранности после пожара следует осуществлять согласно действующим техническим нормативным правовым актам с учетом подходов, изложенных в настоящей работе.

3. Результаты исследований могут быть использованы в проектных и строительных организациях Республики Беларусь и Социалистической Республики Вьетнам при проектировании огнестойких и огнесохранных конструкций с применением ячеистых блоков.

Методика расчета несущих стен зданий с применением автоклавных ячеистых блоков внедрена в практику Научно-технического прикладного исследовательского центра по проведению пожарной профилактики, противопожарных и аварийно-спасательных операций Социалистической Республики Вьетнам.

Результаты исследований внедрены в строительную практику «ООО Безопасная технология Тхан Лонг» при проектировании несущей стены REI 150 19-этажного жилого дома для Военной команды столицы Ханой, Вьетнам.

4. Результаты исследований могут быть использованы в учреждениях образования.

Материалы диссертации внедрены в образовательном процессе ГУО «Командно-инженерный институт» МЧС Республики Беларусь при изучении тем «Огнестойкость зданий», «Противопожарные преграды и преграды с нормируемым пределом огнестойкости» в части оценки огнестойкости и огнесохранности сжатых строительных конструкций из автоклавных аэрированных ячеистобетонных блоков.

Материалы диссертации внедрены в преподавательскую практику Пожарного института Министерства общественной безопасности Социалистической Республики Вьетнам по дисциплинам «Пожарная безопасность в строительстве» и «Строительные материалы при пожаре».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в научно-технических журналах

1 Nguyen, T.K. Fire resistance evaluation of reinforced concrete structures / V. Kudryashov, A. Shirko, A. Lupandin, T.K. Nguyen // Scientific Journal of RTU: Safety of Technogenic Environment. – 2012. –№ 3. – P. 45-49.

2 Нгуен, Т.К. Огнестойкость автоклавного ячеистого бетона на основе экспериментальных диаграмм деформирования после высокотемпературного нагрева / Т.К. Нгуен, В.А. Кудряшов // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – №2/24. – С. 10-22.

3 Нгуен, Т.К. Моделирование прогрева конструкций из автоклавного ячеистого бетона в условиях пожара / Т.К. Нгуен, В.А. Кудряшов // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – №2/24. – С. 23-35.

4 Нгуен, Т.К. Огневые испытания натурного фрагмента стального каркаса здания с конструктивной огнезащитой и ограждением из ячеистых стеновых блоков/ Т.К. Нгуен, В.А. Кудряшов, С.М. Жамойдик, А.Е. Лупандин, С.С. Ботян, А.С. Дробыш // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2016. – № 1(39). – С. 96-113.

Материалы и доклады конференций

5 Кудряшов В.А., Нгуен Т.К. Анализ решения дифференциального уравнения теплопроводности для железобетонных конструкций, подвергающихся одностороннему воздействию пожара // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сборник материалов VI междунар. науч.-практ. конф. курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов), Минск, 5-7 апреля 2012 г.: в 2 ч. / Минск. КИИ МЧС РБ; редкол.: И.И. Полевода [и др.]. – Минск, 2012. – Ч. 1. – С. 108-110.

6 Кудряшов В.А., Нгуен Т.К. Огнестойкость строительных конструкций из автоклавных аэрированных ячеистобетонных камней // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сборник материалов VII междунар. науч.-практ. конф. курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов), Минск, 4-5 апреля 2013 г.: в 2 ч. / Минск. КИИ МЧС РБ; редкол.: И.И. Полевода [и др.]. – Минск, 2013. – Ч. 1. – С. 79-80.

7 Кудряшов В.А., Нгуен Т.К. Огнестойкость строительных конструкций из автоклавных аэрированных ячеистобетонных камней // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: сборник материалов междунар. конф.

молодых ученых, Минск, 28 ноября 2013 г. / Минск. НИИ ПБиЧС МЧС РБ; редкол.: Ю.С. Иванов [и др.]. – Минск, 2013. – С. 104-105.

8 Кудряшов В.А., Нгуен Т.К. Экспериментальные исследования теплостойкости автоклавных аэрированных ячеистобетонных камней // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сборник материалов VIII междунар. науч.-практ. конф. курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов), Минск, 3-4 апреля 2014 г.: в 2 ч. / Минск. КИИ МЧС РБ; редкол.: И.И. Полевода [и др.]. – Минск, 2014. – Ч. 1. – С. 76.

9 Кудряшов В.А., Нгуен Т.К. Экспериментальные исследования теплостойкости автоклавных аэрированных ячеистобетонных камней // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сборник материалов IX междунар. науч.-практ. конф. курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов), Минск, 2-3 апреля 2015 г.: в 2 ч. / Минск. КИИ МЧС РБ; редкол.: И.И. Полевода [и др.]. – Минск, 2015. – Ч. 1. – С. 48.

10 Кудряшов В.А., Нгуен Т.К., Ботян С.С., Дробыш А.С, натурные экспериментальные исследования огнестойкости перегородок из автоклавных аэрированных ячеистобетонных камней // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сборник материалов X междунар. науч.-практ. конф. курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов), Минск, 7-8 апреля 2016 г.: в 2 ч. / Минск. КИИ МЧС РБ; редкол.: И.И. Полевода [и др.]. – Минск, 2016. – Ч. 1. – С. 76.

Тезисы докладов

11 Кудряшов В.А., Нгуен Т.К. Огнестойкость строительных конструкций из автоклавных аэрированных ячеистобетонных камней // Инновационные технологии защиты от чрезвычайных ситуаций: сборник тезисов докладов междунар. науч.-практ. конф., Минск, 26-27 сентября 2013 г. / Минск. КИИ МЧС РБ; редкол.: И.И. Полевода [и др.]. – Минск, 2013. – С. 150-151.

Патенты

12 Стенд для испытаний строительных конструкций на огнестойкости: заявка на патент Республики Беларусь на полезную модель / И.И. Полевода, В.А. Кудряшов, В.Е. Бабич, С.М. Пастухов, С.М. Жамойдик, Нгуен Т.К.; заявитель Ком.-инж. ин-т. – № 10911 от 28.02.2016.

РЭЗЮМЭ

Нгуен Тхань Кіен

Вогнеўстойлівасць сціснутых канструкцый з ужываннем аўтаклаўных газаваных ячэістых бетонных блокаў

Ключавыя словы: вогнеўстойлівасць, вогнезахаванасць, аўтаклаўны ячэісты бетон, дыяграмы дэфармавання, тэмпература, цеплаправоднасць, ўсаджванне.

Мэта работы – забяспечыць пажарную бяспеку сціснутых сценавых канструкцый з аўтаклаўных ячэістых бетонных блокаў шляхам распрацоўкі методыкі разліку іх вогнеўстойлівасці пры пажары і вогнезахаванасці пасля пажару, на аснове эксперыментальных дадзеных, якія ўключаюць дыяграмы дэфармавання, заканамернасці працэсу цеплаперадачы і ўсаджванні бетону пры высокатэмпературным нагрэве.

Метады даследавання и апаратура. Комплекс лабараторных і натурных агнявых эксперыментальных даследаванняў узораў і канструкцый, выкананых з ужываннем аўтаклаўных ячэістых бетонаў. Атрыманыя дадзеныя былі падвергнуты тэарэтычнага аналізу.

Атрыманыя вынікі і навізна. Праведзены лабараторныя і натурныя агнявыя эксперыментальныя даследаванні. Вывучана вогнеўстойлівасць і вогнезахаванасць канструкцый, выкананых з ужываннем аўтаклаўных ячэістых бетонаў і выяўлены механізм іх разбурэння. Распрацавана разліковая мадэль ацэнкі вогнеўстойлівасці і вогнезахаванасці, ўдакладнены крытэрыі напружана-дэфармаванага стану названых канструкцый.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Распрацаваная методыка лабараторных і натурных эксперыментальных даследаванняў па ацэнцы вогнеўстойлівасці і вогнезахаванасці канструкцый з ужываннем ячэістых блокаў можа быць выкарыстана для іншых канструктыўных рашэнняў, якія ўключаюць іншыя віды бетонаў і асаблівасці забеспячэння ўстойлівасці мура. Вынікі даследаванняў могуць быць выкарыстаны ў праектных і будаўнічых арганізацыях Беларусі і В'етнама пры праектаванні вогнеўстойлівых і вогнезахаваных канструкцый з ужываннем ячэістых блокаў, а таксама ў адукацыйным працэсе ўстаноў адукацыі.

Галіна выкарыстання. Праектныя, будаўнічыя арганізацыі, вышэйшыя навучальныя ўстановы.

РЕЗЮМЕ

Нгуен Тхань Киен

Огнестойкость и огнесохранность сжатых конструкций с применением автоклавных аэрированных ячеистобетонных блоков

Ключевые слова: огнестойкость, огнесохранность, автоклавный ячеистый бетон, диаграммы деформирования, температура, теплопроводность, усадка.

Цель работы – обеспечить пожарную безопасность сжатых стеновых конструкций из автоклавных ячеистых бетонных блоков путем разработки методики расчета их огнестойкости при пожаре и огнесохранности после пожара, на основе экспериментальных данных, включающих диаграммы деформирования, закономерности процесса теплопередачи и усадки бетона при высокотемпературном нагреве.

Методы исследования и аппаратура. Комплекс лабораторных и натурных огневых экспериментальных исследований образцов и конструкций, выполненных с применением автоклавных ячеистых бетонов. Полученные данные были подвергнуты теоретическому анализу.

Полученные результаты и их новизна. Проведены лабораторные и натурные огневые экспериментальные исследования. Изучена огнестойкость и огнесохранность конструкций, выполненных с применением автоклавных ячеистых бетонов и выявлен механизм их разрушения. Разработана расчетная модель оценки огнестойкости и огнесохранности, уточнены критерии напряженно-деформированного состояния указанных конструкций.

Рекомендации по использованию. Разработанная методика лабораторных и натурных экспериментальных исследований по оценке огнестойкости и огнесохранности конструкций с применением ячеистых блоков может быть использована для других конструктивных решений, включающих иные виды бетонов и особенности обеспечения устойчивости кладки. Результаты исследований могут быть использованы в проектных и строительных организациях Беларуси и Вьетнама при проектировании огнестойких и огнесохранных конструкций с применением ячеистых блоков, а также в образовательном процессе учреждений образования.

Область применения. Проектные, строительные организации, высшие учебные заведения.

SUMMARY

Nguyen Thanh Kien

Autoclaved aerated concrete blocks compressed constructions
fire resistance and fire reliability

Keywords: fire resistance, fire reliability, autoclaved aerated concrete, stress-strain diagrams, temperature, thermal conductivity, shrinkage.

The purposes of work are: to ensure compressed wall structures of autoclaved aerated concrete blocks fire safety through the development of fire resistance and fire reliability design procedure, on the experimental data basis, including full strain diagrams, heat patterns and heat shrinkage process of concrete at high temperature.

Methods of research and equipment. The complex of laboratory and full-scale fire experimental researches for autoclaved aerated concrete. The obtained data were theoretically analyzed.

Obtained data and novelty. The laboratory and full-scale fire experimental studies were held. The fire resistance of autoclaved aerated concrete structures was studied and the mechanism of their destruction was revealed. A design procedure for fire resistance and fire reliability evaluation, as far as refined stress-strain criteria for structures were developed.

Usage recommendations. The test procedures of laboratory and full-scale fire studies to assess the fire resistance and fire reliability of structures using autoclaved aerated concrete blocks can be used for other structural solutions, including different types of concrete and features of masonry stability. The research results can be used in the design and construction organizations of the Belarus and Vietnam in fire-resistant and fire-reliable structures design using aerated concrete blocks, as well as in the educational process of educational establishments.

Application. Engineering and construction organizations, higher educational establishments.