

Министерство высшего и среднего специального образования БССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Аспирант Н.А. ИЛЬИН

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НАГРЕВА НА ПРОЧНОСТНЫЕ  
И ДЕФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМЗИТОБЕТОНА  
И НА СЦЕПЛЕНИЕ ЕГО СО СТЫРЖНЕВОЙ АРМАТУРОЙ

(05.480. Строительные конструкции)

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

М и н с к - 1971

Работа выполнена на кафедре железобетонных конструкций Куйбышевского инженерно-строительного института им. А.И.Микояна.

Научный руководитель - профессор, к.т.н.Б.В.Якубовский

Официальные оппоненты:

доктор технических наук А.И.Яковлев  
кандидат технических наук доцент А.Т.Лобанов

Ведущая организация - НИИКерамзит

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1971 г.

Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1971 г. на заседании Совета по присуждению ученых степеней при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БПИ.

Отзывы (2 экз.) просим направлять по адресу: Минск-27, Ленинский проспект, 65, БПИ, ученому секретарю Совета.

Ученый секретарь Совета,  
канд.технич.наук, доцент

( И.С.КАЧАН )

Проектирование зданий и сооружений, удовлетворяющих пожарно-техническим требованиям, не может быть осуществлено без знания фактической огнестойкости строительных конструкций.

Со времени создания исследовательских огневых установок накоплены значительные экспериментальные данные по огнестойкости железобетонных элементов, изготовленных из тяжелого бетона, но, практически, отсутствуют данные по огнестойкости керамзитобетонных и керамзитожелезобетонных элементов.

Экспериментальный способ оценки огнестойкости керамзитобетонных конструкций требует существенных материальных затрат и времени. Огневые испытания сложны и трудоемки и не дают возможности охватить все многообразные конструкции из керамзитобетона, применяемые в строительстве. Эти недостатки могут быть устранены при оценке огнестойкости элементов расчетным путем.

Большое значение для оценки огнестойкости керамзитобетонных элементов расчетным путем имеет экспериментальное изучение прочностных и деформативных характеристик керамзитобетона, прочности его сцепления с арматурой в условиях воздействия высоких температур.

Целью работы является исследование основных свойств керамзитобетона и керамзитожелезобетона, подверженных воздействию высоких температур, для получения данных по оценке огнестойкости, а так же по оценке пригодности и дальнейшей эксплуатации конструкций из керамзитобетона после огневого воздействия.

Основными задачами исследования в диссертационной работе являются:

- выявление особенностей работы керамзитобетонных конструкций после воздействия высоких температур с учетом изменения прочностных и деформативных свойств керамзитобетона по неравномерно прогрему сечению элемента;
- экспериментальное исследование основных прочностных и деформативных характеристик керамзитобетона, подверженного воздействию высокой температуры и нагрузки;
- экспериментальное изучение влияния высоких температур нагрева на прочность сцепления арматурных стержней с керамзитобетоном;

- создание экспериментальных установок и отработка методики исследования основных свойств керамзитобетона и керамзитожелезобетона в условиях воздействия высоких температур.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав текста на 125 стр., иллюстраций 30, таблиц 46, выводов, заключения и списка литературы (библиографических названий - 168).

В первой главе приводится история вопроса, обзор отечественных и зарубежных исследований и современное состояние оценки огнестойкости керамзитожелезобетонных элементов.

Первоначально, еще в XIX веке, основная группа патентов на железобетон преследовала цель - повышения огнестойкости конструктивных элементов и сооружений. К этой группе относятся работы Ф.Куанье (Франция), Уилкинсона, Торнера (Англия), Скотта, Гиагга (США), Штакеншнейдера Н.И., Жаринцева Д.Ф. (Россия) и др.

Основы советской пожарной охраны заложены в декрете "Об организации государственных мер борьбы с огнем", изданном по инициативе и за подписью В.И.Ленина 17 апреля 1918 года. Особое место в декрете отведено развитию научных исследований.

В 1944-45 гг. проф. В.И. Мурашевым разработаны основы испытания строительных элементов на огнестойкость, в 1946 г. - предложен метод нормирования огнестойкости строительных конструкций.

Во ВНИИ противопожарной обороны (ВНИИПО) МВД СССР, начиная с 1949 г. проводятся систематические испытания огнестойкости железобетонных элементов. В результате этих испытаний А.И. Яковлевым разработаны методы расчета пределов огнестойкости различных железобетонных элементов. Параллельно и во взаимной увязке с ВНИИПО исследованием огнестойкости железобетонных элементов занимались А.Ф. Милованов, Ф.Е. Гитман, В.Г. Олимпиаев (НИИЖБ Госстроя СССР), М.Я. Ройтман, Н.Ф. Бубыр, Н.И. Зенков (ВШ МВД СССР), А.Б. Ашрабов и др.

За рубежом вопросы огнестойкости исследовали: Аштон Л., Мальхотра Х., Хилл А. (Англия), Блинк Г., Буш Г., Буб Г., Кордина К., Леонгардт Ф., Майер - Оттенс В. (ГДР и ФРГ), Густафери А., Тронселл Дж., Карлсон К. (США), Факлер И.П., Бюссон И. (Франция), Харада Т., Каваяге К. (Япония), Оден К. (Швеция) и др.

Огнестойкость керамзитобетонных элементов конструкция может быть определена аналогично огнестойкости железобетонных элементов экспериментально или расчетным путем, однако при этом необходимо учитывать некоторые особенности керамзитобетона при нагреве (пони-

женную прогреваемость, значительное изменение прочностных и деформативных характеристик, взрывообразное разрушение, плавление при температуре выше  $1150^{\circ}\text{C}$  и др.).

Результаты освидетельствования керамзитобетонных конструкций после пожаров показывают, что защитный слой из керамзитобетона служит одной из причин замедленного прогрева рабочей арматуры. Отечественные и зарубежные исследователи считают, что керамзитобетонные элементы по сравнению с конструкциями из тяжелого бетона, обладают повышенной огнестойкостью. Однако количественная оценка огнестойкости у большинства исследователей расходится весьма существенно.

Важнейшие работы по исследованию физико-механических свойств бетонов и арматуры после воздействия высоких температур выполнили: Е.Г.Голиков, М.Я.Ройтман, В.И.Мурашев, К.Д.Некрасов, В.Г.Чернашкин, Э.Г.Ратц, И.А.Маркус, А.И.Мишинский, К.В.Михайлов, А.И.Яковлев, Н.И.Зенков, Г.Д.Салманов (СССР), Мальхотра Х.Л. (Англия), Вайглер Х., Фишер Р. (ФРГ), Харада Т. (Япония) и др.

Анализ экспериментальных исследований показывает, что при нагревании до высоких температур прочность бетонов и арматурных стержней существенно изменяется. Характер изменения зависит от физико-химического состава материала и методики испытаний.

С целью выявления действительного характера работы керамзитобетона в поврежденных нагревом элементах, автор приводил экспериментальные исследования с предварительно нагруженными в процессе нагрева образцами. Величина предварительного нагружения была принята в пределах  $0,2-0,5 \cdot R_{\text{н}}$ , что соответствует напряжениям в бетоне реальных конструкций, находящихся под эксплуатационной нагрузкой. Автором так же проведены исследования влияния воздействия высоких температур нагрева на сцепление арматурных стержней с керамзитобетоном.

Во второй главе рассматриваются особенности работы керамзитобетонных конструкций, поврежденных огнем воздействием, и приводится методика расчета остаточной несущей способности сжатых элементов с учетом степени использования предела прочности керамзитобетона по неравномерно прогретому сечению.

Поврежденную нагревом керамзитобетонную конструкцию можно представить как многослойную конструкцию из материалов монолитно связанных друг с другом, но имеющих различные прочностные и деформативные характеристики. Вследствие низкой прогреваемости бетона в

процессе кратковременного нагрева происходит перепад температур в 100-1000°C по сечению элемента.

Вследствие различной предельной сжимаемости слоев керамзитобетона, при достижении более жестким (основным) слоем временного сопротивления сжатия, напряжения в других ( $i$ -тых) слоях будут меньше предельных.

Под действием равномерно сжимающей нагрузки относительные укорочения волокон рассматриваемых слоев равны между собой ( $\epsilon_{\sigma_{oc}}^{\sigma} = \epsilon_i$ ). Тогда коэффициент использования предела прочности слоя керамзитобетона, имеющего большую предельную сжимаемость, определим из равенства

$$m_i = \frac{\sigma_i}{R_{np}^{\sigma}} = \frac{E_{\sigma_i}}{E_{\sigma_{oc}}}; \quad (1)$$

где  $R_{np}^{\sigma}$  и  $\sigma_i$  - напряжения в основном и в  $i$ -том слое сечения в момент разрушения элемента;

$E_{\sigma_{oc}}$  и  $E_{\sigma_i}$  - модули деформации керамзитобетона в основном и в  $i$ -том слое сечения.

Для перехода в расчете прочности от деформации к напряжениям в сечении элемента необходимо учесть зависимости  $\sigma - \epsilon$ . На основании логарифмического закона деформации, получим формулу:

$$\epsilon = -m \cdot \frac{R_{np}}{E_0} \cdot \ln \left( 1 - \frac{\sigma}{m \cdot R_{np}} \right); \quad (2)$$

которой соответствует выражение модуля деформаций для рассматриваемых слоев керамзитобетона:

$$E_{\sigma_i} = E_{0,i} \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_i}{m_i \cdot R_{np,i}} \right); \quad (3)$$

где  $m \cdot R_{np}$  - условный предел текучести керамзитобетона, представляющий величину напряжения ( $\sigma > R_{np}$ ) при которой модуль полных деформаций становится равным нулю;

$m_i$  - опытный коэффициент для керамзитобетона более I, I.

При линейной зависимости  $\sigma - \epsilon$  величину опытного коэффициента можно определить по формуле:

$$m_i = \frac{1}{1 - \epsilon_i}; \quad (4)$$

где  $E_i$  - мера упругости керамзитобетона при разрушении, равная  $\frac{E_{\sigma_i}}{E_{\sigma_{oc}}}$

Определение опытного коэффициента для других видов бетона на основе экспериментальных данных можно произвести по методике, предложенной С.А.Семенцовым.

В диссертации приведены значения опытного коэффициента для керамзитобетона М 100 предварительно нагруженного на 0,2+0,5 от призмочной прочности после нагрева от 110 до 700°C. Значения опытного коэффициента находятся в пределах 1,38+3,86.

Используя логарифмическую зависимость (2) находим, что при  $\sigma_{oc} = R_{np}$  в момент разрушения элемента предельные деформации основного слоя сечения

$$\epsilon_{oc}^{np} = -\sigma_{oc} \cdot \frac{R_{np}}{E_o} \cdot \ln \left( 1 - \frac{k_o}{\sigma_{oc}} \right). \quad (5)$$

Относительные деформации  $i$ -го слоя керамзитобетона при напряжениях  $\sigma_i = m_i \cdot R_{np}$  не достигают предельных значений и определяются по формуле

$$\epsilon_i = -\sigma_i \cdot \frac{R_{np,i}}{E_{o,i}} \cdot \ln \left( 1 - \frac{m_i}{\sigma_i} \right). \quad (6)$$

На основании равенства деформации слоев сечения, приравняв правые части уравнений (5) и (6) и решив полученное равенство относительно коэффициента использования предела прочности слоев керамзитобетона по неравномерно прогретому сечению, находим:

$$m_i = \sigma_i \cdot (1 - e^{k_i}); \quad (7)$$

где  $e = 2,718$  - основные натуральные логарифмов,

$$k_i = \frac{1 - \sigma_{oc}}{1 - \sigma_i} \cdot \frac{\beta_i}{\gamma_i} \cdot \ln \sigma_i, \quad (8)$$

$$\beta_i = \frac{E_{o,i}}{E_{o,oc}}; \quad \gamma_i = \frac{R_{np,i}}{R_{np,oc}}; \quad (9)$$

$\beta_i$  и  $\gamma_i$  - коэффициенты изменения начального модуля упругости и призмочной прочности керамзитобетона в зависимости от температуры нагрева.

Коэффициент использования предела прочности слоев керамзитобетона  $m_i$  может быть определен непосредственно из опыта, для чего нужны экспериментальные кривые  $\sigma - \epsilon$ . Значения коэффициента, определенные теоретически по формуле (7), отличаются от значений коэффициента, определенных из опыта не более чем на 5%.

Расчет остаточной прочности керамзитобетонного элемента, поврежденного нагревом, производят по приведенному сечению. Приведенное сечение панели, подверженной одностороннему огневому воздействию, от первоначального отличается тем, что ширина рассматриваемого слоя (параллельно изотермам прогрева) уменьшена на величину коэффициента приведения. Толщину рассматриваемых слоев принимают равной фактической.

Из различия определения напряжений в основном и в  $\epsilon$ -том слое в предельной стадии работы элемента, вытекают различные способы приведения сечения. В диссертации приведено сравнение величин коэффициентов приведения слоев сечения, вычисленных без учета и с учетом степени использования остаточной прочности керамзитобетона по неравномерно прогретому сечению. Использование значений коэффициентов приведения слоев сечения, определенных по формуле

$$n_i = \frac{R_{sp.i}}{R_{sp.oe}} \cdot m_i = m_i \cdot \gamma_i \quad (10)$$

дает более близкое совпадение с опытными данными.

Вследствие того, что наиболее прогретые слои керамзитобетона по сечению элемента имеют большие величины предельной сжимаемости и не достигают остаточного временного сопротивления сжатию при разрушении основного слоя элемента, эквивалентное сечение приводим к материалу основного слоя.

Теоретические значения остаточной прочности керамзитобетонных стеновых панелей неравномерно прогретых по сечению сравнивались с опытными данными ВНИИ противопожарной обороны.

Величины теоретических значений остаточной прочности керамзитобетонных панелей с использованием коэффициента приведения слоев сечения, вычисленных без учета степени использования предела прочности керамзитобетона по неравномерно прогретому сечению, на 30-35% больше опытных. Небольшие отклонения (3-5%) опытных данных с теоретическими значениями получены при использовании расчетных формул (7-10), учитывающих степень использования предела прочности слоев керамзитобетона по сечению неравномерно прогретого элемента.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований прочностных и деформативных характеристик предварительно нагруженного конструктивно-теплоизоляционного керамзитобетона после воздействия высоких температур (до 700°C).

Задачами экспериментального исследования являлись:

- определение призмной прочности керамзитобетона в зависимости от температуры и величины предварительного нагружения при нагреве;

- определение модуля деформаций при сжатии, коэффициента упругости керамзитобетона и изменение объемной массы керамзитобетона, подверженного воздействию заданных температур;

- изготовление оборудования и отработка методики экспериментального исследования керамзитобетона в условиях воздействия высоких температур и нагрузки.

Испытания керамзитобетона при нагреве до заданной температуры производились после охлаждения в четырех состояниях:

I - образцы керамзитобетона, не имеющие предварительного нагружения в процессе нагрева;

II, III и IV - образцы керамзитобетона предварительно нагруженные при нагреве соответственно на 20, 30 и 50% от первоначальной призмной прочности.

Нагрев образцов-призм  $15 \times 15 \times 60$  см производился до температур  $110 - 700^{\circ}\text{C}$  через каждые  $100^{\circ}\text{C}$ . Скорость подъема температуры была равна  $120^{\circ}\text{C}$  в час. Регулирование температуры в нагревательных печах производилось автоматически с помощью электронных приборов.

Величины исследуемых температур нагрева от  $110$  до  $700^{\circ}\text{C}$  принимают по тем соображениям, что после кратковременного ( $1+6$  час) воздействия высоких температур ( $1000+1200^{\circ}\text{C}$ ) по сечению элемента температуры распределяются неравномерно: на поверхности конструкции достигают  $800-900^{\circ}\text{C}$ , на границе защитного слоя бетона -  $500-700^{\circ}\text{C}$  и в толще элемента от  $600$  до  $20^{\circ}\text{C}$ .

Образцы изготовлялись партиями по 6 шт одновременно в горизонтальном положении продольной оси в формах, отвечающих ГОСТ 10180-62. Состав легкобетонной смеси (по весу)  $1:0,42:1,26:0,65$  (портландцемент Жигулевского завода марки 400: керамзит Безымянского опытного завода марки 300: керамзитовый песок марки 700: вода), которой соответствовал составу керамзитобетона, применяемого для изготовления несущих стен экспериментального жилого дома в г. Новокуйбышев. Керамзитобетонная смесь приготавливалась в бетономешалке принудительного действия 5-7 мин. Уплотнение свежеложенного бетона производилось на лабораторном вибростоле с пригрузом  $20 \text{ гс/см}^2$ . Образцы 28 дней хранились во влажной среде, а в дальнейшей (3 мес) в воздушно-сухих условиях.

Фактическая призмная прочность керамзитобетона M 100 в нор-

мальных условиях составляла  $75 \text{ кгс/см}^2$ , объемная масса  $1150 \text{ кг/м}^3$  при влажности  $8,8\%$ .

Для экспериментального изучения основных свойств керамзитобетона при высоких температурах автором были запроектированы и изготовлены специальные установки. Оборудование для экспериментальных работ состояло из нагревательных электрических печей сопротивления, силовых пружинных установок и блока регулирования температуры.

Нагревательные печи (7 шт) были изготовлены полными с размером внутреннего пространства  $240 \times 240 \times 650 \text{ мм}$ . Нагревательный элемент — трехзаходная спираль из нихрома  $\phi 1,2 \text{ мм}$ . Мощность печи 2 кв.

Силовые установки (4 шт) оборудованные печами, предназначены для предварительного нагружения образцов в процессе нагревания. Усилие сжатия, создаваемое силовой пружинной установкой на образец, составляло от 3,4 до 8,5 т с.

Блок регулирования температуры предназначен для подъема температуры в печах с заданной скоростью (град. в мин) до заданной величины, а так же для автоматического регулирования и записи ее. Блок регулирования температуры состоит из 10-ступенчатого трехфазного трансформатора с контроллером, автоматических электронных потенциометров типа ПСР1-01(05), которые в комплекте с термопарами ТХА, реле МКВ-48 и магнитными пускателями ПА-312 предназначены для регулирования температуры в нагревательных печах, на поверхности и по сечению образца.

Образцы, предназначенные для испытания, подвергались тщательному осмотру, измерению и взвешиванию. Прогрев образцов в печах контролировался по контрольной призме, оборудованной термопарами, установленными в характерных точках сечения призмы. После охлаждения образец на третьи сутки вынимался из печи, взвешивался, на него устанавливались приборы и подвергался испытанию.

Для измерения деформаций сжатых волокон керамзитобетона на каждую грань призмы прикреплялись тензодатчики сопротивления (база  $30 \times 3 = 90 \text{ мм}$ ) и малогабаритные индикаторы часового типа с ценой деления  $0,002 \text{ мм}$  (база  $300 \text{ мм}$ ).

Нагружение сцентрированных призм производили ступенями по 0,1 разрушающего усилия. Сброс нагрузки до начальной производили до ступени, равной 0,6; начиная со ступени 0,7 до разрушения, разгружение образца не производилось. Определение прочностных и деформативных характеристик керамзитобетона, подверженного воздействию высоких температур, произведено по методике НИИ бетона и железобето-

на.

Основные результаты испытаний керамзитобетона, подверженного воздействию высокой температуры и нагрузки, приведены в диссертации в виде таблиц и графиков.

При предварительном нагружении равном  $0,2+0,3$  от призменной прочности величина коэффициента изменения временного сопротивления сжатию керамзитобетона, подверженного воздействию высокой температуры, увеличивалась по сравнению с ненагруженным керамзитобетоном. При нагреве от  $110$  до  $400^{\circ}\text{C}$  временное сопротивление сжатию предварительно нагруженного керамзитобетона на  $5-10\%$  выше значений временного сопротивления ненагруженного керамзитобетона. После нагрева до  $500-600^{\circ}\text{C}$  временное сопротивление сжатию предварительно нагруженного керамзитобетона снижалась соответственно на  $5-20\%$ , ненагруженного - на  $30-40\%$  от величины временного сопротивления ненагретого керамзитобетона.

Более резкое снижение временного сопротивления сжатию после нагрева выше  $200^{\circ}\text{C}$  отмечено у образцов керамзитобетона предварительно нагруженного на  $0,5$  от величины призменной прочности.

Модуль упругости керамзитобетона предварительно нагруженного на  $0,2+0,5$  от призменной прочности при заданных температурах нагрева снижается на  $5-10\%$  меньше, чем у ненагруженного.

Предельная сжимаемость после нагрева ненагруженного керамзитобетона увеличивается пропорционально температуре нагрева. При предварительном нагружении на  $0,2-0,3 \cdot R_{\text{ср}}^{\text{н}}$  керамзитобетона величина его предельной сжимаемости увеличивается на  $10-12\%$ . При предварительном нагружении равном  $0,5 \cdot R_{\text{ср}}^{\text{н}}$  предельная сжимаемость керамзитобетона после нагрева выше  $200^{\circ}$  снижается на  $3-12\%$  по сравнению с ненагруженными образцами.

Потеря объемной массы керамзитобетона при нагреве на  $200, 300, 400, 500, 600$  и  $700^{\circ}\text{C}$  равняется  $4,8; 5,4; 6,0; 6,5; 7,3$  и  $7,7\%$  от объемной массы керамзитобетона влажностью  $4\%$ .

В результате математической обработки исследуемых характеристик керамзитобетона методами вариационной статистики установлено, что полученные результаты достоверны, показатель точности достигнет  $1,5\%$ , показатель изменчивости менее  $6\%$ .

В четвертой главе приведены результаты исследований влияния высокой температуры на величину сцепления арматурных стержней с керамзитобетоном.

Задачи исследования прочности сцепления стержневой арматуры с керамзитобетоном при этом сводились к следующим:

- определение величины предельного условного напряжения  $\hat{\sigma}_{сх}$  и временного сопротивления контактного слоя керамзитобетона  $\hat{\sigma}_e$ , а также величины напряжений в арматуре, вызывающих начальное скольжение  $\sigma_{сх}$  и полное разрушение контактного слоя керамзитобетона  $\sigma_{роз.г}$ ;
- определение параметра сцепления  $\mathcal{R}_c$ , представляющего отношение величины относительной деформации арматурного стержня при напряжении  $\sigma_0 \pm 0,2 \cdot \sigma_{роз.г}$  к величине абсолютного удлинения конца нагруженного стержня при этом же напряжении;
- определение величины критического сдвига нагруженного и свободного от нагрузки концов исследуемых арматурных стержней;
- определение величины отношения временного сопротивления контактного слоя керамзитобетона к остаточной призмной прочности его  $\hat{\sigma}_e : R_{пр.т}$ ;
- выявление влияния вида продольного профиля арматурных стержней на величину прочности сцепления с керамзитобетоном, подверженным воздействию высоких температур.

Прочность сцепления арматурных стержней с керамзитобетоном М 100 была определена на армированных призмах размерами 15х15х28 см. Образцы изготавливались партиями по 12 шт одновременно из легкобетонной смеси состава (по весу) 1:0,42:1,26:0,65.

Призмы (28 шт) армировались гладкой арматурой марки Ст.3  $\varnothing$  12 мм класса А-I ( $\sigma_T = 3100$  кгс/см<sup>2</sup>) и арматурой периодического профиля (40 шт) марки 25Г2С  $\varnothing$  14 мм класса А-III ( $\sigma_T = 4040$  кгс/см<sup>2</sup>). Стержни заделывались в керамзитобетон на величину 24 диаметров для гладкой арматуры и 20 диаметров для арматуры периодического профиля. Образцы после 28-дневного хранения во влажной среде находились 100-130 дней до нагрева в воздушно-сухих условиях.

Нагрев образцов до заданных температур (от 110 до 400 и 700°C через каждые 100°C) производился автоматически в электрических печах со скоростью подъема температуры 120°C в час.

Характеристики сцепления определялись путем выдергивания забетонированного стержня из бетона призмы, опирающейся торцом.

Испытания образцов после нагрева до заданных температур были произведены в охлажденном состоянии спустя 3 дня после нагрева на универсальной разрывной машине ГРМ-I в специальном центрирующем устройстве. При каждой заданной температуре, испытания производи-

лись на 4-х образцах-близнецах. Контрольные (ненагретые) образцы испытывались по 6 шт для каждого вида арматуры. Нагружение образцов с гладкой арматурой производилось ступенями по 100 кг, с арматурой периодического профиля - по 200 кг. Смещение нагружаемого и сдвиг свободного конца арматурного стержня измерялись индикаторами с ценой деления 0,002 мм.

Пределные условные напряжения и временные сопротивления контактного слоя керамзитобетона зависят от изменения физико-механических свойств материалов после нагрева и от конструкции образцов (профиля, периметра арматуры и длины ее заделки в керамзитобетон). Напряжения сцепления и параметр сцепления для гладкой арматуры с керамзитобетоном прямолинейно зависят от величины температуры нагрева (график - прямая линия, функция монотонно убывает). Для арматуры периодического профиля напряжения сцепления имеют криволинейную зависимость от температуры нагрева.

Величина критического сдвига нагруженного конца гладкого стержня после нагрева от 110 до 400°C находилась в пределах от 0,83 до 0,90 см, свободного - от 0,23 до 0,60 см. Для арматуры периодического профиля после нагрева от 110 до 700°C величина критического сдвига нагруженного конца колеблется от 0,24 до 0,58 см, свободного - от 0,10 до 0,19 см.

Для образцов, армированных гладкими стержнями, отношение  $\hat{\varepsilon}_g : R_{\text{п.т.}}$  = 0,22 при нормальной температуре. С повышением температуры нагрева до 110, 200, 300 и 400°C это отношение значительно снижается и соответственно равно 0,17; 0,16; 0,09 и 0,04.

Для образцов, армированных стержнями периодического профиля отношение  $\hat{\varepsilon}_g : R_{\text{п.т.}}$  при нормальной температуре составляет 0,27. С увеличением температуры нагрева от 110 до 700°C это отношение повышается незначительно и в среднем равно 0,33.

Максимальные напряжения в стержнях гладкой арматуры при их выдергивании не превышали  $0,47 \cdot \sigma_{\text{т.т.}}$ ; в стержнях арматуры периодического профиля не превышали  $0,60 \cdot \sigma_{\text{т.т.}}$  - предела текучести стали после отжига при заданных температурах.

Влияние вида продольного профиля арматуры на прочность сцепления с керамзитобетоном, подверженным воздействию высоких температур, определялось путем сравнения полученных величин  $\hat{\varepsilon}_{\text{сн}}$ ;  $\hat{\varepsilon}_g$ ;  $\lambda_c$  и  $\hat{\varepsilon}_g : R_{\text{п.т.}}$  для образцов, армированных гладкой арматурой и арматурой периодического профиля. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о значительно лучшей работе арматуры периоди-

ческого профиля при сцеплении с керамзитобетоном, подверженным воздействию повышенных и высоких температур.

Математической обработкой результатов исследований установлена их достоверность, при этом показатели точности и изменчивости соответственно менее 5 и 10%.

В пятой главе приводятся обобщенные результаты экспериментальных исследований свойств керамзитобетона и керамзитожелезобетона, подверженного воздействию высокой температуры.

На прочностные и деформативные характеристики керамзитобетона, подверженного высокотемпературному воздействию, существенное влияние оказывают величина заданной температуры нагрева и характер ее изменения, состав бетона, его возраст и влажность, величина предварительного нагружения при нагреве, размеры и формы опытных образцов и условия хранения их после нагрева. В опытах автора принималась различная степень нагрева (от 110 до 700°C через каждые 100°C) и различные состояния при нагреве образцов: без нагружения и предварительно нагруженные. При этом образцы имели одинаковый возраст, влажность (4,0%) и водоцементное отношение ( $B/C=0,65$ ); одну скорость подъема температуры (120°C в час), одинаковые условия охлаждения и хранения (воздушно-сухие) и равный срок выдержки после нагрева перед испытанием (3-4 дня).

Призмная прочность ненагруженного керамзитобетона при нагреве от 110 до 400°C изменяется незначительно. При дальнейшем повышении температуры нагрева призмная прочность ненагруженного керамзитобетона резко снижается и после 500, 600 и 700°C нагрева составляет соответственно 70, 62 и 49% от первоначальной.

При предварительном нагружении на  $0,2$  и  $0,3 \cdot R_{np}^x$  временное сопротивление сжатию керамзитобетона увеличивается на 2-7% и 4-13% при нагреве от 110 до 400°C. После нагрева до температур 500 и 600°C призмная прочность нагруженного керамзитобетона снижается до 93-80% и 96-82% от первоначальной. Следовательно, призмная прочность предварительно нагруженного керамзитобетона на  $0,2-0,3 \cdot R_{np}^x$  после нагрева до 500 и 600°C снижается в среднем на 25 и 20% меньше, чем ненагруженного.

При предварительном нагружении равно  $0,5 \cdot R_{np}^x$  показатели призмной прочности керамзитобетона возрастают на 15, 20 и 10% после нагрева до 110, 200 и 300°C. После нагрева выше 400-500°C призмная прочность керамзитобетона на 7-13% меньше по сравнению с контрольными значениями.

Разница в значениях временного сопротивления керамзитобетона в зависимости от величины предварительного нагружения и температуры нагрева объясняется с позиций физических представлений о прочности бетона (по Бергу О.Я.).

Результаты математической обработки опытных данных позволяют значения коэффициента, учитывающего влияния величины температуры и предварительного нагружения на призмическую прочность керамзитобетона определять по формулам (II, I2, 22, 23, 26, 27, 30 и 3I) (табл. I)

Сравнение изменения прочностных характеристик керамзитобетона загруженного на 0,33 от временного сопротивления сжатию, которые были получены в опытах Вайглера Х. и Фишера Р. (ФРГ), показывает небольшое расхождение (2-10%) с данными экспериментальных исследований автора.

Нагревание керамзитобетона вызывает более резкое изменение (монотонное убывание) модуля упругости, чем прочности. Начальный модуль упругости ненагруженного керамзитобетона после нагрева на 200, 400 и 600°C снижается соответственно до 0,8; 0,6 и 0,4 от величины модуля упругости ненагретого керамзитобетона. Модуль упругости предварительно нагруженного на 0,2 и 0,3  $R_{np}^*$  керамзитобетона снижается на 5-8% меньше, чем ненагруженного. При предварительном нагружении, равном 0,5  $R_{np}^*$  начальный модуль упругости снижается более интенсивно и после нагрева выше 500°C абсолютное значение его меньше, чем у ненагруженного керамзитобетона. Значения коэффициента, учитывающего влияние температуры и предварительного нагружения на начальный модуль упругости керамзитобетона представлены линейной функцией (формулы I3, 24, 28 и 32, табл. I).

Коэффициент упругости керамзитобетона с ростом напряжений снижается от 0,8 до 0,5. На величину коэффициента упругости повышение температуры нагрева оказывает большее влияние, чем изменение напряжений при испытании от 0,25 до 1,0 разрушающего усилия. При предварительном нагружении керамзитобетона коэффициент упругости повышается на 5-8% при напряжениях 0,25-0,50 разрушающего усилия. При более высоких напряжениях коэффициент упругости на 6-10% меньше, чем у ненагруженного керамзитобетона.

Относительная предельная сжимаемость ненагретого керамзитобетона  $M 100$  составляла  $\epsilon_{cm}^{np} = 1,36 \cdot 10^{-5}$ . С повышением температуры нагрева  $\epsilon_{cm}^{np}$  керамзитобетона существенно увеличивается. Для предварительно нагруженного керамзитобетона на 0,2-0,3 от призмической прочности предельная сжимаемость в среднем на 7-14% выше, чем у ненагру-

Т а б л и ц а I

Коэффициенты изменения основных характеристик керамзитобетона в зависимости от температуры нагрева

Величина предварительного нагружения	Номера формул	Обозначения характеристик	Эмпирические зависимости коэффициентов изменения исследуемых характеристик керамзитобетона (%) после нагрева до температуры, °С						
			20	110	200	300	400	500	600
Ненагруженный керамзитобетон	(11, 12)	$R_{np.t}$	$100-5,4 \cdot 10^{-3}(t-20); 40+19,5 \cdot 10^{-2}(700-t);$						
	(13)	$E_{s.t}$	$28,0+10,6 \cdot 10^{-2} \cdot (700-t);$						
	(14)	$E_{a.t}$	$100 \sqrt{1-0,3 \cdot 10^{-3}(t-20)}];$						
	(15)	$\epsilon_{ср.t}^{np}$	$100+25,6 \cdot 10^{-2} \cdot (t-20);$						
	(16)	$\gamma_{0.t}$	$\gamma_{ср} \cdot (1,0-0,05 \cdot 10^{-3}t);$						
	(17)	$\epsilon_{0.t}^2$	$20,8 \cdot \sqrt{1+10^{-2} \cdot (400-t)}];$						
	(18)	$\lambda_t^2$	$100 \cdot \sqrt{1-0,27 \cdot 10^{-2} \cdot (t-20)}];$						
	(19, 20)	$\lambda_t^2$	$115 \cdot \sqrt{1+10^{-4}(500-t)}]; 60 \cdot \sqrt{1-0,5 \cdot 10^{-2} \cdot (700-t)}];$						
	(21)	$\lambda_t^2$	$100 \cdot \sqrt{1,0-0,94 \cdot 10^{-3}(t-20)}].$						
0,2 от нормативной призмной прочности	(22, 23)	$R_{np.t}$	$100+3,2 \cdot 10^{-2}(t-20); 68+10,5 \cdot 10^{-2}(700-t);$						
	(24)	$E_{s.t}$	$36,0+10,0 \cdot 10^{-2}(700-t);$						
	(25)	$\epsilon_{ср.t}^{np}$	$100+29,5 \cdot 10^{-2}(t-20).$						
0,3 от нормативной призмной прочности	(26, 27)	$R_{np.t}$	$100+4,3 \cdot 10^{-2} \cdot (t-20); 70+10,5 \cdot 10^{-2} \cdot (700-t);$						
	(28)	$E_{s.t}$	$40,0+9,7 \cdot 10^{-2}(700-t);$						
	(29)	$\epsilon_{ср.t}^{np}$	$100+31,0 \cdot 10^{-2} \cdot (t-20).$						
0,5 от нормативной призмной прочности	(30, 31)	$R_{np.t}$	$100+11 \cdot 10^{-2}(t-20); 50+14,0 \cdot 10^{-2}(700-t);$						
	(32)	$E_{s.t}$	$20,0+12,8 \cdot 10^{-2} \cdot (700-t);$						
	(33)	$\epsilon_{ср.t}^{np}$	$100+16,7 \cdot 10^{-2} \cdot (t-20).$						

женного и аппроксимируется уравнениями (15, 25, 29 и 33, табл. I).

Потеря объемной массы высушенного керамзитобетона (начальная влажность 4,0%) после нагрева до 700°C соответственно составляла 7,7%. Изменение объемной массы керамзитобетона, подверженного воздействию заданных температур, можно определить по формуле (16).

Результаты исследования влияния высоких температур на  $\hat{\zeta}_{сд}$  и  $\hat{\zeta}_e$  показывают интенсивное снижение прочности сцепления гладкой арматуры с повышением температуры нагрева.

Прочность сцепления арматуры периодического профиля с керамзитобетоном увеличивается после нагрева до  $110^{\circ}\text{C}$  ( $\hat{\zeta}_{сд}$  - на 140%,  $\hat{\zeta}_e$  - на 120% от первоначальной). В интервале  $110+600^{\circ}\text{C}$  нагрева прочность сцепления постепенно снижается до контрольных значений. После нагрева до  $700^{\circ}\text{C}$  прочность сцепления испытуемых образцов становится меньше контрольных значений на 40%. Коэффициент изменения прочности сцепления стержневой арматуры с керамзитобетоном можно определить по предлагаемым формулам (17, 19 и 20, табл. I).

Процесс деформирования (сдвига) арматурного стержня при выдергивании из керамзитобетона определяется параметром сцепления, величина которого характеризует качество сцепления и степень вовлечения в работу керамзитобетона, окружающего стержень.

Для гладкой арматуры класса А-I с ненагретым керамзитобетоном параметр сцепления равен  $3 \cdot 10^{-2} \cdot \text{см}^{-1}$ . С повышением температуры нагрева от  $110$  до  $400^{\circ}\text{C}$   $\mathcal{L}_e^2$  интенсивно снижается и коэффициент его снижения аппроксимируется функцией (18, табл. I).

Для арматуры класса А-III с ненагретым керамзитобетоном параметр сцепления равен  $7,7 \cdot 10^{-2} \cdot \text{см}^{-1}$ . С повышением температуры нагрева  $\mathcal{L}_e^2$  снижаются менее интенсивно, чем  $\mathcal{L}_e^2$ . Коэффициент снижения  $\mathcal{L}_e^2$  в интервале от  $110$  до  $700^{\circ}\text{C}$  можно определить по формуле (21, табл. I).

На величину параметра сцепления в основном влияет температура нагрева и вид поверхности сталей. Остаточная прочность керамзитобетона существенного влияния на величину параметра сцепления не оказывает.

Сравнение результатов испытаний показывает, что величина критического сдвига загруженного и свободного конца арматурного стержня изменяется с повышением температуры.

Начальный сдвиг на  $0,1$  мм свободного конца гладкой арматуры происходит при  $(0,4 \pm 0,7)$  от выдергивающего усилия. Сдвиг на  $0,2$  мм соответствует нагрузке  $(0,5 \pm 0,9)$ , сдвиг на  $0,3$  мм -  $(0,80 \pm 0,95)$  от разрушающего усилия.

Начальный сдвиг на  $0,1$  и  $0,15$  мм свободного конца арматуры периодического профиля происходит при нагрузке соответственно  $0,85$  и  $0,95$  от разрушающего усилия.

Для сравнения величины отношения  $\xi_c : R_{по.т}$  приводятся экспериментальные данные для тяжелого бетона (А.Ф.Милованов, В.М. Прядно). Для керамзитобетона, армированного гладкой арматурой, отношение  $\xi_c : R_{по.т}$  при 100+300°C нагрева в 1,5 - 2 раза выше, чем для тяжелого бетона. При нагреве выше 300°C эти отношения для обоих бетонов равны. Для керамзитобетона, армированного арматурой периодического профиля,  $\xi_c : R_{по.т} = 0,33$ , что на 8 - 14% ниже значений для тяжелого бетона в интервале от 110 до 500°C нагрева.

Усилие выдергивания при одной и той же остаточной прочности керамзитобетона и методики испытаний зависит только от профиля арматурного стержня. Проведенными опытами установлено, что продольный профиль поверхности имеет решающее значение для обеспечения связи арматурных стержней с керамзитобетоном, подверженным воздействию высоких температур. Это вытекает из характера разрушения прогретых керамзитобетонных призм и из полученных величин прочности сцепления арматурных стержней с керамзитобетоном. Выдергивание гладкой арматуры из керамзитобетона происходит плавно, без разрушения призмы на части. Выдергивание арматуры периодического профиля не происходит после нарушения поверхностного сцепления, так как прочность сцепления в дальнейшем обеспечивается реактивными силами на выступающих частях поверхности и силами трения. При достижении критического сдвига свободного конца стержня призмы разрушались с раскалыванием на две - три части.

По результатам исследования керамзитобетона и керамзитожелезобетона, подверженного воздействию высокой температуры, предложены рекомендации по количественной оценке учета влияния температуры (110-700°C) и предварительного нагружения на прочностные и деформативные характеристики керамзитобетона и на прочность сцепления арматурных стержней с керамзитобетоном.

## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

I. Проведенные исследования показали, что методы расчета, применяемые в настоящее время для определения несущей способности сжатых керамзитобетонных элементов конструкций, неравномерно прогретых по сечению кратковременным воздействием высоких температур, не учитывают степень использования остаточной прочности керамзитобетона по сечению в момент его разрушения.

2. Коэффициент использования предела прочности керамзитобетона по неравномерно прогретому сечению можно определять по формуле (7) как функции изменения прочностных и деформативных характеристик керамзитобетона, подверженного воздействию температуры и нагрузки.

3. Коэффициент приведения слоев сечения элемента поврежденного кратковременным нагревом, можно принимать по формуле (10) пропорционально отношению прочностных характеристик прогретого керамзитобетона с поправкой на степень использования предела его прочности по сечению. Сечение элемента следует приводить к основному, наимее прогретому слою бетона.

4. Экспериментально установлены зависимости изменения призмной прочности, начального модуля упругости и модуля деформации, коэффициента упругости и меры упругости, предельной сжимаемости и объемной массы керамзитобетона, подверженного воздействию температуры в интервале 110 - 700°C с предварительным нагружением в пределах  $0,2 \div 0,5 \cdot R_{\text{пр}}^{\sim}$ . Данные о прочности сцепления керамзитобетона со стержневой арматурой гладкой и периодического профиля получены после нагрева соответственно до 400 и 700°C.

5. Изменение основных свойств керамзитобетона от воздействия высокой температуры характеризуется следующими данными:

а) остаточная призмная прочность керамзитобетона при  $100 \leq t \leq 400^{\circ}\text{C}$  нагрева повышается соответственно при предварительном нагружении на  $0,2-0,3 \cdot R_{\text{пр}}^{\sim}$  на 2-7% и 4-13%, при 500 и 600°C нагрева снижается на 7-20% и 4-12% по сравнению с призмной прочностью ненагретого керамзитобетона; призмная прочность керамзитобетона при предварительном нагружении на  $0,5 \cdot R_{\text{пр}}^{\sim}$  после нагрева до 500°C снижается до 70% от величины значений ненагреваемого керамзитобетона;

б) начальный модуль упругости керамзитобетона после нагрева до 200, 400 и 600°C снижается на 17,36 и 57% при  $\sigma_s = 0,2 \cdot R_{\text{пр}}^{\sim}$  на 12, 35 и 50% при  $\sigma_s = 0,3 \cdot R_{\text{пр}}^{\sim}$  и на 7; 36 и 65% при  $\sigma_s = 0,5 \cdot R_{\text{пр}}^{\sim}$  по сравнению с первоначальным значением;

в) коэффициент упругости находится в пределах 0,85-0,50, снижаясь с ростом напряжений от загрузки и температуры нагрева;

г) мера упругости снижается от 0,74 до 0,50 с возрастанием температуры нагрева от 20 до 600°C;

д) предельная сжимаемость керамзитобетона при предварительном нагружении на  $0,2 \div 0,3 \cdot R_{\text{пр}}^{\sim}$  после нагрева до 200, 400 и 600°C возрастает в 1,6; 2,2; 2,9 раза; при предварительном нагру-

жени на  $0,5 R_{np}''$  - соответственно в 1,45; 1,80 и 2,1 раза;

д) потеря объемной массы высушенного керамзитобетона при  $110 \leq t \leq 700^\circ\text{C}$  равна в среднем 0,5% на каждые  $100^\circ\text{C}$  нагрева.

6. Предварительное нагружение на  $(0,2 \div 0,3) R_{np}''$  благоприятно сказывается на изменении прочностных и деформативных характеристики керамзитобетона; на предварительном нагружении на  $0,5 R_{np}''$  величины исследуемых характеристик после нагрева более  $200^\circ\text{C}$  получены ниже, чем для ненапряженного керамзитобетона.

7. Экспериментальными исследованиями влияния повышенных и высоких температур нагрева на сцепление стержневой арматуры с керамзитобетоном установлено:

а) прочность сцепления гладкой арматуры с керамзитобетоном при 110, 200, 300 и  $400^\circ\text{C}$  нагрева уменьшается до 78, 60, 40 и 20% от первоначальной величины прочности сцепления;

б) прочность сцепления арматуры периодического профиля с керамзитобетоном при 110, 200-500, 600 и  $700^\circ\text{C}$  нагрева равна 120, 115-110, 96 и 60% от первоначальной (при  $20^\circ\text{C}$ );

в) начальный сдвиг (0,1 мм) свободного конца гладкой арматуры происходит при 40-70%, арматуры периодического профиля - при 80-85% от величины выдергивающего усилия;

г) прочность сцепления арматуры периодического профиля с керамзитобетоном в интервале  $110+400^\circ\text{C}$  нагрева в 2+8 раз выше, чем у гладкой арматуры (в зависимости от величины температуры нагрева).

8. В процессе проведения экспериментальных исследований отработана методика испытания керамзитобетона на воздействие высокой температуры и нагрузки. Изготовленные установки и специальное оборудование показали надежность и простоту в работе.

9. Дальнейшие исследования по данному вопросу могут быть направлены на проведение специальных разработок по количественному учету факторов, влияющих на изменение физико-механических свойств керамзитобетона при нагреве.

10. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при пересмотре СНиП П-А. 5-70 "Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений", "Инструкции по определению фактических пределов огнестойкости железобетонных конструкций расчетным путем" и при решении вопросов возможности повторного применения керамзитобетонных конструкций, поврежденных кратковременным нестационарным воздействием высоких температур.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора:

1. И л ь и н Н.А. Некоторые вопросы методики экспериментальных исследований огнестойкости железобетонных конструкций. Материалы ко II симпозиуму "Экспериментальные исследования инженерных сооружений", Ленинград 18-21 ноября 1969 г., вып. № 17, Куйбышев, 1969.

2. И л ь и н Н.А. Влияние пожара на железобетонные конструкции промышленных зданий. "Промышленное строительство", 1970, № 11, стр.47-49.

3. И л ь и н Н.А. Влияние предварительного нагружения и высоких температур на прочностные и деформативные свойства керамзитобетона. Реф. сб. ЦИНИС "Межотраслевые вопросы строительства. Отечественный опыт", 1970, № 9, стр.75-78.

4. И л ь и н Н.А. Испытание керамзитобетона. "Пожарное дело", 1971, № 2, стр.26-27.

5. И л ь и н Н.А. Сцепление стержневой арматуры с керамзитобетоном после нагрева до 700<sup>0</sup>C. "Бетон и железобетон", 1971, №2, стр.24-25.

6. И л ь и н Н.А. Влияние высоких температур на сцепление арматуры с керамзитобетоном. Реф. сб. ЦИНИС "Межотраслевые вопросы строительства. Отечественный опыт", 1971, № 2, стр.31-33.

7. И л ь и н Н.А. Определение пригодности к дальнейшей эксплуатации элементов железобетонных конструкций, поврежденных пожаром. Сб. "Научно-методические и экспериментально-теоретические исследования" КуИСИ, Куйбышев, 1971 (в печати).

8. И л ь и н Н.А. К расчету огнестойкости железобетонных конструкций. Сб. "Железобетонные конструкции. Научно-методические и экспериментально-теоретические исследования". КуИСИ, Куйбышев, 1971(в печати).

Результаты исследований, излагаемых в диссертации, докладывались автором:

- на XXV, XXVI, XXVII и XXVIII научно-технических конференциях Куйбышевского инженерно-строительного института в 1968-1971 гг;

- на Второй городской конференции молодых ученых и специалистов 22-24 октября 1968 г., г. Куйбышев (обл);

- на областной научно-технической конференции "За прогресс в строительстве", посвященной 100-летию со дня рождения В.И.Ленина, 23-25 апреля 1969г., г.Куйбышев (обл);
- на Всесоюзном симпозиуме "Экспериментальные исследования инженерных сооружений", 18-21 ноября 1969г., г.Ленинград;
- на Первой Всесоюзной научно-технической конференции по легким бетонам 20-23 октября 1970г., г.Минск;
- на XXII научно-технической конференции Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института 19-24 апреля 1971г., г.Минск.

АТ 08224. Подписано в печать 23/IV-71г. Формат 60x84<sup>I</sup>/16.  
Объем 1,2 печ.л.; 1,4 уч.-изд.л. Тир.200. Зақ.4II. Бесплатно.

---

БПИ. Минск, Ленинский пр., 65.