

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Инженерно-строительный институт**

На правах рукописи

ХА ВАН КУИНЬ

**Трещиностойкость, деформации и прочность внецентренно сжатых
железобетонных элементов из высокопрочного бетона при
неравномерном нагреве**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Направление подготовки 08.06.01 Техника и технологии строительства

Код и наименование

Специальность 05.23.01 Строительные конструкции, здания и сооружения

Код и наименование

Санкт Петербург

2020

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе промышленно-гражданского и дорожного строительства. Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ:

*Лазарев Юрий Георгиевич
Д.т.н, профессор ВШПГиДС*

Научный руководитель:

*Корсун Владимир Иванович
Д.т.н, профессор ВШПГиДС*

Рецензенты:

*Ватин Николай Иванович
Д.т.н, профессор ВШПГиДС*

*Барабанищikov Юрий Германови
Д.т.н, профессор ВШПГиДС*

*Белов Вячеслав Вячеславович
Д.т.н, профессор, главный
строитель технического
управления Атомэнергопроект*

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность Бетон является одним из самых универсальных строительных материалов, который широко применяется уже более полутора столетий. Создание современных высокопрочных, высокоэффективных бетонов (ВЭБ) стало большим прорывом в бетонной технологии. Применение ВЭБ позволяет повысить несущую способность конструкций, снизить их вес, повысить коррозионную стойкость и долговечность.

Вьетнам расположен в тропическом жарком и влажном климате с следующими параметрами:

- диапазон климатических температур в течение года - от +15 °С до +40°С.
- диапазон изменения влажности воздуха в течение года - от 35% до 80%.
- диапазоны дневных изменений температуры и влажности составляют: $\Delta T = 10 \div 15$ °С; $\Delta W = 45 \div 50\%$.

Жаркие и влажностные климатические факторы оказывают существенное влияние на процессы твердения бетона, формирование его первоначальной структуры, определяют качество бетона и долговечность бетонных конструкций, обеспечивают поддержку функционального дизайна.

Данные о влиянии тропического климата Вьетнама на прочность и деформации конструкций из высокопрочных бетонов крайне ограничены.

Развитие методов расчета железобетонных конструкций из высокопрочных бетонов на основе более полного учета особенностей формирования их напряженно-деформированного состояния (НДС), характеристик прочностных и деформативных свойств материалов является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования.

Цель работы Исследование характеристик физико-механических и реологических свойств высокопрочного бетона применительно к условиям жаркого и тропического климата и развитие методики расчета трещиностойкости, деформаций и прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов при совместимом действии нагрузки и перепадов температуры и влажности.

Основные задачи исследования

1. Экспериментально исследовать влияние повышенных до 90° С температур и влажности до 80% на деформации и прочность высокопрочного бетона при осевом сжатии и растяжении.

2. Экспериментально исследовать влияние повышенных до 90°C температур на усадку и ползучесть высокопрочного бетона.
3. Разработать практические рекомендации в части учета влияния повышенных температур и влажности на характеристики физико-механических и реологических свойств высокопрочного бетона.
4. Выполнить экспериментальные исследования закономерностей деформирования и прочности железобетонных элементов из высокопрочного бетона при внецентренном сжатии в условиях нагревания до $+90^{\circ}\text{C}$.
5. Выполнить теоретические исследования характеристик НДС элементов из высокопрочного бетона при действии перепадов температуры, влажности и внецентренного сжатия.
6. Разработать рекомендации по учету влияния продолжительности нагружения повышенных до 90°C температур и влажности на деформации и прочность внецентренно сжатых железобетонных элементов из высокопрочного бетона.

Объект исследования - внецентренно сжатые железобетонные элементы зданий из высокопрочного бетона, подвергающиеся воздействиям повышенных температур и увлажнения.

Предмет исследования - характеристики механических свойств высокопрочных бетонов и в условиях повышенных температур и влажности, характеристики НДС железобетонных элементов при внецентренном сжатии в условия неравномерного нагрева.

Научная новизна результатов исследования

Экспериментальные данные о влиянии повышенных до 90°C температур и влажности до 80% на деформации и прочность высокопрочного бетона при осевом сжатии.

Экспериментальные данные о влиянии повышенных до 90°C температур на температурно-усадочные деформации и ползучесть высокопрочного бетона.

Количественные характеристики закономерностей деформирования и изменения прочности железобетонных элементов из высокопрочного бетона при внецентренном сжатии в условиях неравномерного нагрева.

Теоретические данные о характеристиках НДС внецентренно сжатых элементов из высокопрочного бетона при действии перепадов температуры и влажности.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы

Выявление закономерностей влияния повышенных температурно-влажностных воздействий на деформации и прочность высокопрочного бетона.

Разработка рекомендаций по учету влияния температурно-влажностных воздействий на характеристики свойств ВПБ а также на усилия в статически неопределенных железобетонных конструкциях из высокопрочного бетона.

Методы исследования:

- методы физического и математического моделирования;
- механические методы испытаний материалов нагружением и измерения перемещений.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на двух международных научно-практической конференциях « International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering » (г. Санкт Петербург, 2019 г.); International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (г. Владимир , 2020 г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано четыре печатные работы, две из которых входят в перечень Scopus-индексируемых изданий.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Текст диссертации, изложенный на 90 страницах, включает 43 рисунка и две таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации изложены актуальность работы, цель и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность, представлена информация о связи с госбюджетной научно-технической программой и об апробации работы.

В разделе 1 выполнен анализ работ, посвященных исследованию влияния основных параметров окружающей среды на физические процессы, связанные с формированием структуры и влиянием на свойства бетона, выдержанного в условиях жаркого влажного климата для регионов юго-восточной Азии, в том числе для Вьетнама (работы Копылова В. Д. Хо Нгок Кхоа, Нгнен Куи Дык). Для определения влияния на характеристики свойств бетона основных физических процессов, связанных с нагревом и увлажнением, авторами указанной статьи проведены эксперименты в естественных условиях жаркого климата при комплексном влиянии переменных параметров среды. Авторы делают вывод: прочность бетонов с пластифицирующими добавками выше, чем у бетонов без добавок. На основании этих результатов сформулированы предложения по улучшению свойств бетонов монолитных конструкций, возводимых в условиях жаркого влажного климата.

Выполнен анализ результатов исследований характеристик НДС изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных конструкций в условиях нормальных и повышенных температур, в том числе для конструкций из высокопрочного бетона. В работах А.П. Кричевского, В.И. Корсуна, В.А. Косторниченко, Н.А. Невгения и и других исследователей). Все

экспериментальные исследования по изучению температурных усилий и прочности изгибаемых железобетонных элементов при неравномерном нагреве выполнены для случая совпадения плоскости температурного перепада с плоскостью изгиба элемента. Сведения об экспериментальных исследованиях температурных усилий и предельных состояний железобетонных изгибаемых элементов, работающих при действии нагрева и нагрузки в несовпадающих плоскостях, из анализа литературных источников не выявлены.

Рассмотрено также влияние повышенных температур на характеристики свойств бетона. Ползучесть бетона при одноосном сжатии в условиях повышенных температур исследовалась в работах (Александровский С.В, Альтшулер Б.А, Шахов И.И., Щербатюк Е.А., А.П.Кричевского, J. Sercombe, W.H. Dilger). Наиболее значимо влияние на ползучесть бетона при повышенных температурах оказывают такие факторы как температура и продолжительность нагрева, уровень нагружения, продолжительность действия температуры на бетон до нагружения и др. С увеличением температуры нагрева возрастает скорость развития деформаций ползучести интенсивно высыхающего бетона и происходит их более быстрое затухание. Отмечено, что ползучесть высокопрочных модифицированных бетонов недостаточно изучена для условий длительных нагружений высоких уровней, что сдерживает их широкое применение в строительстве.

Во втором разделе представлены состав примененного высокопрочного модифицированного бетона, характеристики опытных образцов, изложены методики проведения экспериментальных и теоретических исследований, методы обработки полученных результатов.

Экспериментальные исследования проводились на образцах, изготовленных из тяжелого бетона, состав которого представлен в табл.1.

Таблица 1

Расход материалов на 1м³ бетонной смеси

№	Наименование материалов	Расход, кг
1.	Цемент пластифицированный М500	490
2.	Щебень (5-20мм)	850
3.	Песок	790
4.	Модификатор МБ 10-50С	95...1
		00

Выдерживание образцов в формах до распалубки – в течение одних суток.

Программа исследований включала три группы экспериментов:

- Исследование физико-механических характеристик бетона при кратковременном и длительном нагружении в условиях нормальных и повышенных до 90°C температур (вид нагрева - кратковременный в воде и длительный с увлажнением) при выдержке во влажной среде. (рис 1)

- Исследование температурно-усадочных деформаций и ползучести высокопрочного бетона при осевом сжатии в условиях нагрева до +90°C. (рис 2)

- Исследование трещиностойкости деформаций и несущей способности железобетонных элементов из высокопрочного бетона в условиях длительных нагружений и одностороннего нагрева до +90°C.

Температурные усилия исследовались на железобетонных балочных элементах с размерами 120x240x2400 мм, армированных в растянутой зоне – 2 Ø 14 АШ, в сжатой зоне – 2 Ø 8 АІ, поперечная арматура – Ø 6 АІ. (рис. 3)

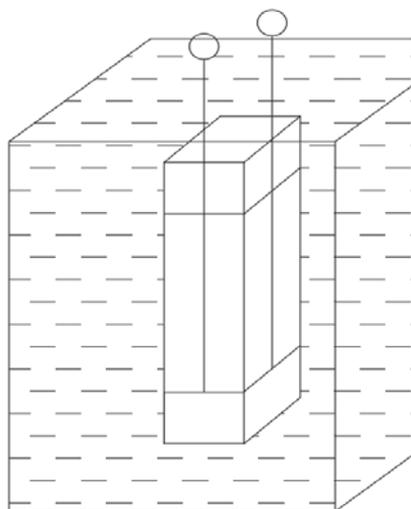


Рис 1. Схема способа нагрева в воде

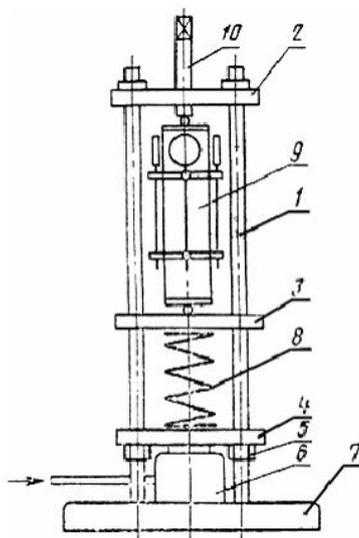


Рис 2. Схема устройства для определения деформаций ползучести





Рис 3. Конструкция опытных образцов-балок.

Характеристики прочностных и деформативных свойств, температурно-усадочные деформации и ползучесть бетона исследовались на образцах-призмах с размерами 100x100x400мм. Исследование ползучести бетона проводилось на специальных пружинных установках, оборудованных теплоизоляционными камерами с электронагревателями и пружинами для длительного нагружения. Возраст бетонных призм к началу нагрева составлял 60÷90 суток, железобетонных балок – 90÷360 суток.

В разделе 3 представлены результаты экспериментальных исследований влияния повышенных температурно-влажностных воздействий, кратковременного и длительного нагрева до $+90^{\circ}\text{C}$. на температурно-усадочные деформации, ползучесть, на характеристики прочностных и деформационных свойств высокопрочного модифицированного бетона при осевом и внецентренном сжатии, предложения по учету влияния изученных факторов на характеристики реологических и механических свойств бетона.

Прочность при сжатии и растяжении. Выполнено 2 серии экспериментальных исследований образцов: первая серия - определение изменения прочности высокопрочного бетона (с добавкой МБ 10-50С) и без них при выдержке во влажной среде. Вторая серия - изменение прочности высокопрочного бетона (с добавкой МБ 10-50С) при выдержке во влажной и сухой среде. Результаты испытаний представлены на рис.4. и рис.5.

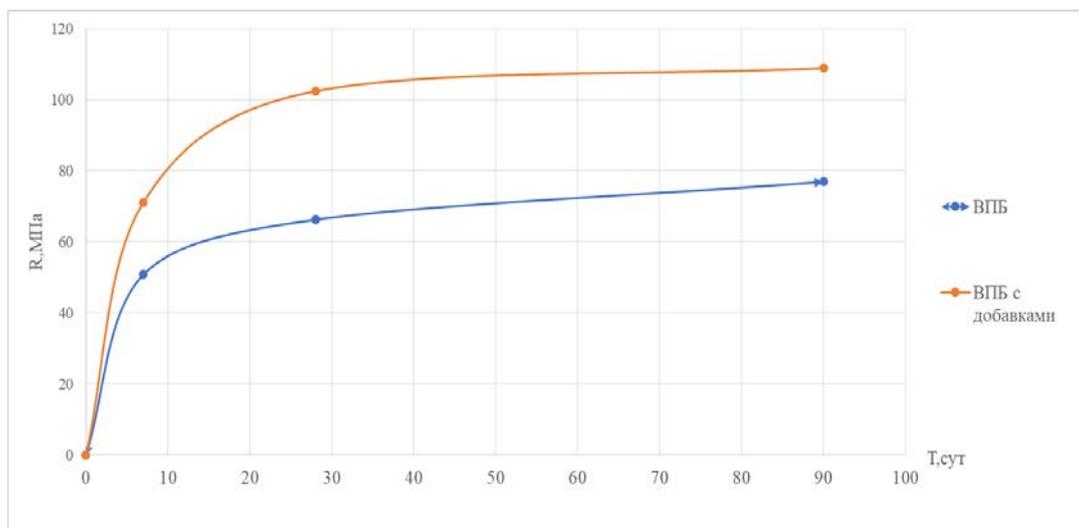


Рис 4. Изменение прочности высокопрочного бетона с добавками и без них при выдержке во влажной среде.

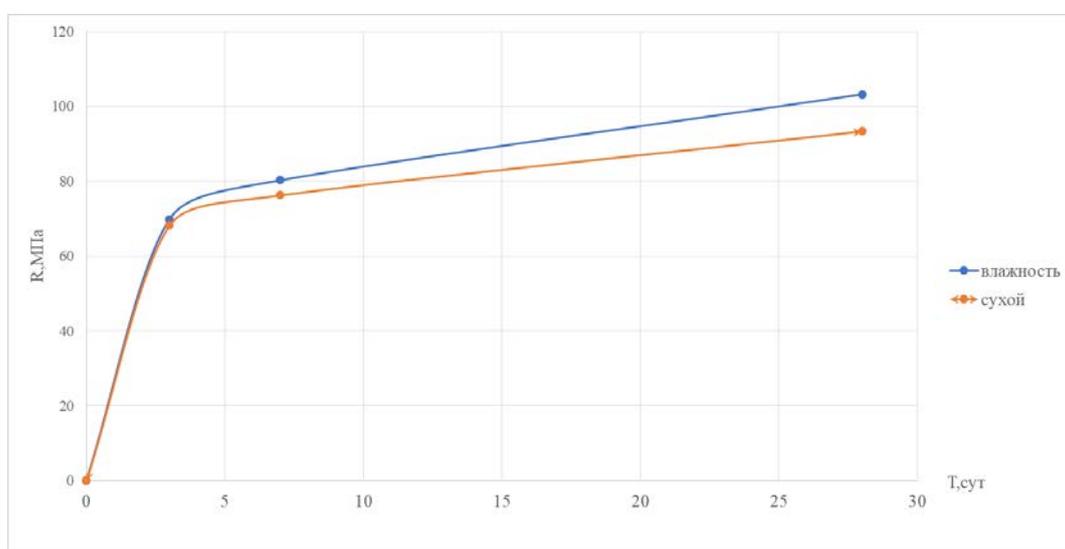
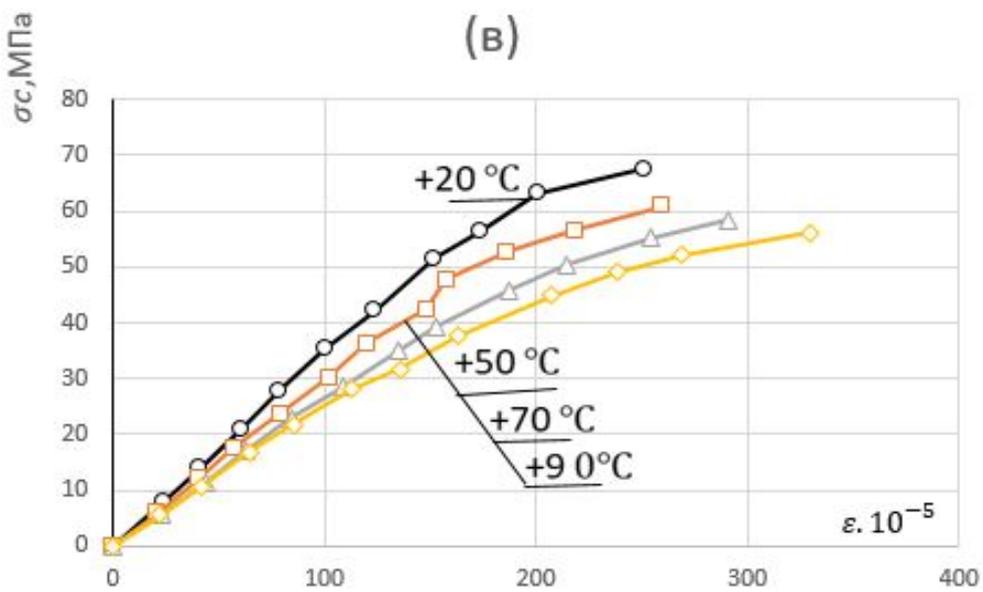
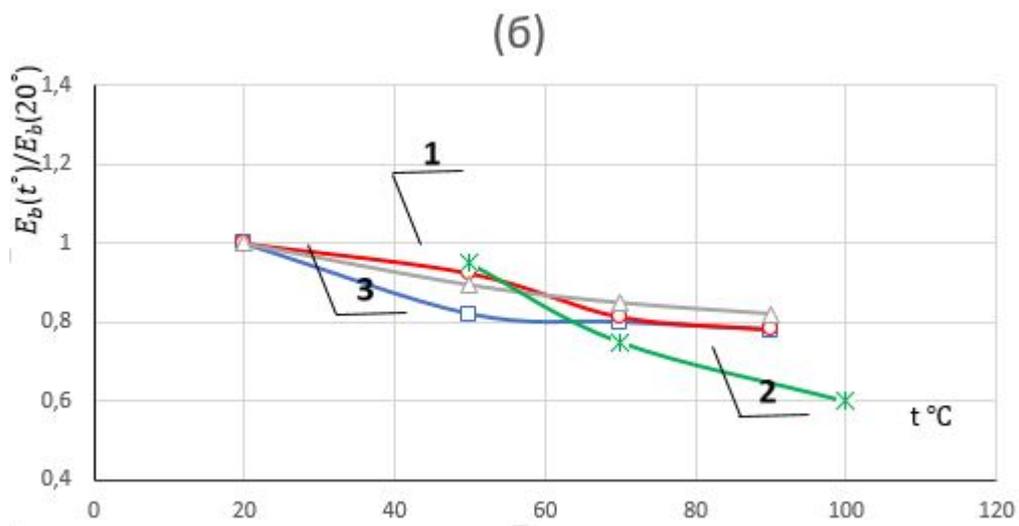
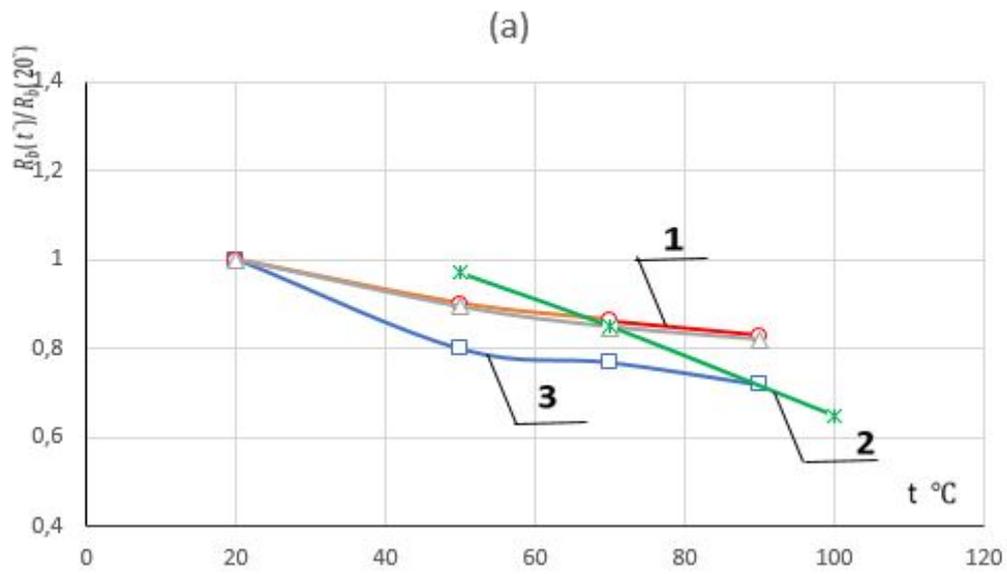


Рис 5. Изменение прочности высокопрочного бетона при выдержке во влажной и сухой среде.

Высокопрочным модифицированным бетонам характерны более высокие темпы набора прочности в первые сутки твердения, чем высокопрочным бетонам, приготовленным по традиционной технологии. По данным исследований кубиковая прочность бетонов в возрасте 3 и 7 сут составляла 60...75% от 28-суточной прочности.

Результаты испытаний образцов бетона при температурах нагрева (кратковремя в воде) по прочности



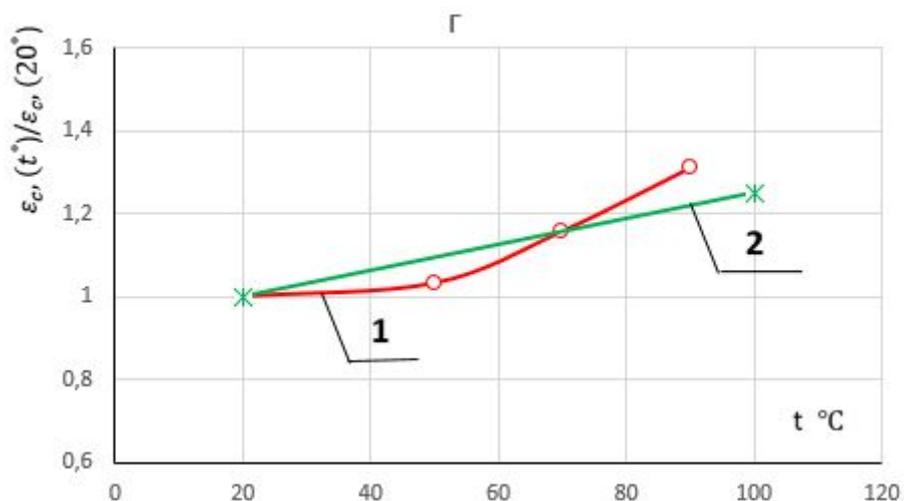


Рис 7. Влияние повышенных температур на прочности бетона при нагрева (а), модуль упругости (б), диаграмма напряжения-деформации (в), предел деформаций бетона при сжатии (г).

—○— По опытные В.И. Корсун, В.К. Ха —□— В.И. Корсун, Кхон Кхемарак —*— По СНИП 27.13330.2017

Снижение призматической прочности высокопрочного бетона при осевом сжатии при кратковременного нагрева (воде) составляли соответственно 10%, 14%, 17% при температурах +50°C, +70°C, +90°C, по сравнению со значениями прочности при нормальной температуре (рис. 7а), модуль упругости - 8%, 19%, 22% (рисунок 7б), предельная деформация сжатия увеличилась на 3%, 16%, 30% (рисунок 7г).

И при насыщение бетон приводит к снижению прочности высокопрочного бетона на 9% по сравнению с сухой бетон потому что при насыщении материала водой существенно изменяются его свойства: повышаются средняя плотность, теплопроводность, происходят структурные изменения в материале

В разделе 4 представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния длительного одностороннего нагрева на характеристики НДС внецентренно сжатых железобетонных элементов из высокопрочного модифицированного бетона с учетом неоднородности прочностных и деформативных свойств материалов при совместимом действии нагрузки, перепадов температуры и влажности, а также результаты исследований НДС центрально- и внецентренно сжатых элементов применительно к конструкциям несущих колонн высотных зданий с целью оценки эффективности применения высокопрочных бетонов для их возведения.

В экспериментах и в расчетах на всех этапах нагружения определялись деформации удлинения срединной оси ϵ_{oz} , кривизны χ_x и χ_y , прогибы, величины температурных моментов, напряжения в бетоне и арматуре, момент образования и ширина раскрытия трещин, прочность при последующем возрастающем догружении.

В теоретической части исследований определение характеристик НДС

Внецентренно сжатых железобетонных элементов выполнялось с помощью специальной программы на ПЭВМ. В методике расчета учтены основные специфические свойства железобетона: физическая нелинейность деформирования, неравновесность процессов, неоднородность свойств и работа с трещинами. Деформации температурного расширения, усадки и ползучести определялись для бетона по методике В.И. Корсуна.

Расчета схема неоднородного железобетонного элемента

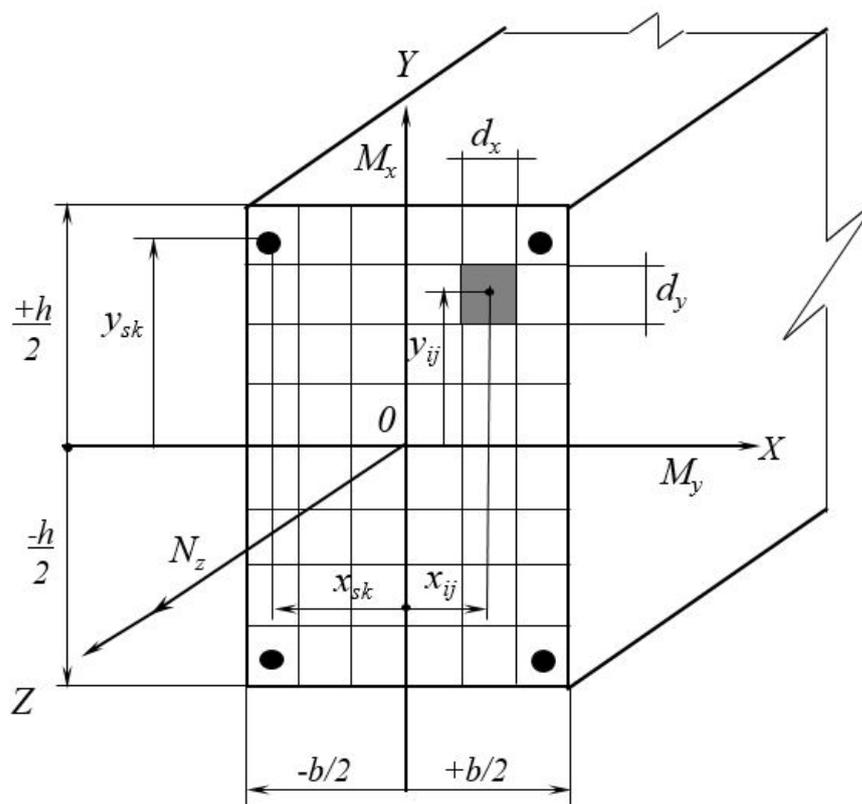


Рис 8. Расчетная модель балочного элемента с неоднородными свойствами

Общий расчет выполняется в результате расчета системы уравнений, состоящей из:

- уравнений физических для слоев бетон и арматуры
- уравнений геометрических
- уравнений статического равновесия

Принятая расчетная модель основывается на следующих предпосылках расчета. Рассматривается железобетонный элемент прямоугольного сечения с размерами $b \cdot h$ и

расположением арматуры в нижней и верхней зонах сечения. Распределение температуры по высоте и ширине сечения считается заданным, при этом температура является функцией координат x_{ji}, y_{ji} . Рассматривается случай неравномерного нагрева по сечению балочных железобетонных элементов при произвольной ориентации плоскости направления теплового потока относительно главных осей сечения элемента. Полагается, что элемент может свободно удлиняться вдоль осей "x" и "y" т.е., $\sigma_x = 0, \sigma_y = 0$.

Механические характеристики бетона и арматуры принимаются функциями температуры. Сечение элемента с неоднородными свойствами представляется в виде системы элементарных участков площадью $dF = dx * dy$

(рис.4.1). Полагается, что в пределах элементарного участка напряжение $\sigma_{z,ji}$, температура бетона и его физико - механические свойства постоянны.

Физические соотношения, связывающие внутренние усилия и деформации на уровне срединной оси, получены на основе раздельного учета физической нелинейности и длительных процессов в бетоне.

Полные деформации элементарного участка бетона $\varepsilon_{b,ji}$ в направлении оси "Z" принимаются в виде суммы деформаций, обусловленных напряжением $\sigma_{z,ji}$, температурным расширением, усадкой $\varepsilon_{cs,ji}$ и ползучестью $\varepsilon_{c,ji}$ бетона:

$$\varepsilon_{b,ji} = \frac{\sigma_{z,ji}}{E_{b,ji}} + \alpha_{bt,ji} * \Delta t_{b,ji} + \varepsilon_{cs,ji} + \varepsilon_{c,ji}, \quad (4.1)$$

где $E_{b,ji}$ - модуль деформации участка бетона с координатами по сечению x_{ji}, y_{ji} :

$$E_{b,ji} = E_b * \beta_{b,ji}.$$

Полная деформация k-го арматурного стержня $\varepsilon_{s,k}$ складывается из составляющих, обусловленных действием напряжения $\sigma_{s,k}$ и температурного расширения $\alpha_{st,k} * \Delta t_{s,k}$:

$$\varepsilon_{s,k} = \frac{\sigma_{s,k}}{E_{s,k}} + \alpha_{st,k} * \Delta t_{s,k}. \quad (4.2)$$

Из соотношений (4.1) - (4.2) выражения для напряжений в ji -ом участке бетона $\sigma_{z,ji}$ и k-том арматурном стержне $\sigma_{s,k}$ записываются следующим образом:

$$\sigma_{z,ji} = E_{b,ji} * (\varepsilon_{b,ji} - \alpha_{bt,ji} * \Delta t_{b,ji} - \varepsilon_{cs,ji} - \varepsilon_{c,ji}); \quad (4.3)$$

$$\sigma_{s,k} = E'_{s,k} * \left(\varepsilon_{s,k} - \alpha_{st,k} * \Delta t_{s,k} \right). \quad (4.4)$$

Модуль деформации арматуры, в том числе пересекаемой трещиной, определяется по формуле:

$$E'_{s,k} = E_s * \frac{\beta_{s,k}}{K_{s,k}}. \quad (4.5)$$

В выражениях (4.2) - (4.5) :

$\alpha_{st,k}$ - коэффициент температурного расширения k-го арматурного стержня [76];

$\beta_{s,k}$ - коэффициент, учитывающий изменение модуля упругости арматуры при нагреве, принимаемый согласно СНиП 2.03.04-84 [76];

$E_{s,k}$ - модуль упругости k-го стержня арматуры;

$K_{s,k}$ - коэффициент, учитывающий наличие трещин, пересекающих данный арматурный стержень, принимаемый $K_{s,k} = 1$ при отсутствии и $K_{s,k} = \Psi_s$ при наличии трещин;

Ψ_s - коэффициент, учитывающий работу растянутого бетона на участке между трещинами.

Из условий статической эквивалентности напряжений и внутренних усилий записываются выражения для изгибающих моментов и продольных сил в сечении, нормальном к продольной оси элемента,:

$$M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} \sigma_{z,ji} * dx * dy * y_{ji} + \sum_{k=1}^{ns} \sigma_{s,k} * f_{s,k} * y_{s,k}; \quad (4.6)$$

$$N_z = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} \sigma_{z,ji} * dx * dy + \sum_{k=1}^{ns} \sigma_{s,k} * f_{s,k};$$

где x_{ji}, y_{ji} - расстояния соответственно вдоль осей X и Y от центра тяжести ji-го участка бетона до срединной оси элемента;

x_{sk}, y_{sk} - то же, для k -го арматурного стержня;

$f_{s,k}$ - площадь поперечного сечения k -го стержня арматуры.

Подставляя в формулы (4.6) выражения (4.3) - (4.5), и принимая справедливой гипотезу плоских сечений:

$$\varepsilon_{b,ji} = \varepsilon_{OZ} + \chi_X * y_i + \chi_Y * x_j, \quad (4.7)$$

получаем искомые физические соотношения, которые могут быть представлены в более компактной форме, если осуществим группировку членов, содержащих продольные относительные деформации элемента ε_{OZ} на уровне срединной оси и кривизны χ_X, χ_Y относительно осей X и Y :

$$\begin{vmatrix} M_x \\ M_y \\ N_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} \chi_X \\ \chi_Y \\ \varepsilon_{OZ} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} M_{OX} \\ M_{OY} \\ N_{OZ} \end{vmatrix}, \quad (4.8)$$

где жесткостные коэффициенты A_1, \dots, C_3 и элементы свободного вектора-столбца представляются в форме :

$$A_1 = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} E_b * dx * dy * y_i^2 + \sum_{k=1}^{ns} y_{s,k}^2 * f_{s,k} * E'_{s,k}; \quad (4.9)$$

$$B_1 = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} E_b * dx * dy * x_i * y_i + \sum_{k=1}^{ns} x_{s,k} * y_{s,k} * f_{s,k} * E'_{s,k}; \quad (4.10)$$

$$C_1 = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} E_b * dx * dy * y_i + \sum_{k=1}^{ns} y_{s,k} * f_{s,k} * E'_{s,k}; \quad (4.11)$$

$$B_2 = \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{+\frac{b}{2}} E_b * dx * dy * x_i^2 + \sum_{k=1}^{ns} x_{s,k}^2 * f_{s,k} * E'_{s,k}; \quad (4.12)$$

$$C_2 = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} E_b * dx * dy * x_i + \sum_{k=1}^{ns} x_{s,k} * f_{s,k} * E'_{s,k}; \quad (4.13)$$

$$C_3 = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} E_b * dx * dy + \sum_{k=1}^{ns} f_{s,k} * E'_{s,k}; \quad (4.14)$$

$$A_2 = B_1; \quad A_3 = C_1; \quad B_3 = C_2; \quad (4.15)$$

$$M_{ox} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} E_{b,ji} * y_i * (\alpha_{bt,ji} * \Delta t_{ji} + \varepsilon_{cs,ji} + \varepsilon_{c,ji}) * dx * dy - \sum_{k=1}^{ns} y_{s,a} * f_{s,a} * \alpha_{s,a} * \Delta t_{s,a} * E'_{s,k}; \quad (4.16)$$

$$M_{oy} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} E_{b,ji} * x_i * (\alpha_{bt,ji} * \Delta t_{ji} + \varepsilon_{cs,ji} + \varepsilon_{c,ji}) * dx * dy - \sum_{k=1}^{ns} x_{s,a} * f_{s,a} * \alpha_{s,a} * \Delta t_{s,a} * E'_{s,k}; \quad (4.17)$$

$$N_{oz} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} E_{b,ji} * (\alpha_{bt,ji} * \Delta t_{ji} + \varepsilon_{cs,ji} + \varepsilon_{c,ji}) * dx * dy - \sum_{k=1}^{ns} f_{s,a} * \alpha_{s,a} * \Delta t_{s,a} * E'_{s,k}; \quad (4.18)$$

При решении задач об определении напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов, подвергающихся воздействиям различной длительности неравномерного нагрева и изгиба, учет неоднородности свойств бетона по сечению элемента осуществляется путем замены его по высоте и ширине сечения системой однородных участков конечных размеров Δx и Δy .

Участки рассматриваются как линейно напряженные слои. В пределах каждого участка на каждом этапе нагружения температура, напряжения и характеристики физико-механических свойств материала принимаются постоянными и равными их значениям в центре тяжести

участка. В связи со ступенчатым изменением напряжений по сечению элемента при переходе от участка к участку интегральные выражения в формулах (4.9)-(4.18) заменяются квадратурными формулами.

В процессе расчета наличие или отсутствие трещин определяется отдельно для каждого рассматриваемого участка. До образования трещин, т.е., при выполнении условий:

$$\sigma_{z, ji} \leq R_{bt, tem, ji}; \quad \varepsilon_{z, ji} \leq \varepsilon_{zu, ji}; \quad (4.19)$$

полагается:

$$E'_{b, ji} = E_{ji}, \quad (4.20)$$

где $\varepsilon_{zu, ji}$ - предельные деформации на растяжение ji -го участка бетонного сечения элемента, определяемые по формуле:

$$\varepsilon_{zu, ji} = \frac{2 * R_{bt, tem, ji}}{\beta_{b, ji} * E_b}; \quad (4.21)$$

$E'_{b, ji}$ - модуль деформаций ji -го участка бетона;

E_{ji} - модуль упругопластичности ji -го участка бетона, определяемый по формуле (1.1).

После образования трещин ($\varepsilon_{z, ji} \geq \varepsilon_{zu, ji}$) для соответствующих элементарных участков принималось:

$$E'_{b, ji} = 0 \quad (4.22)$$

Соответствие решений для брусьев по изложенной методике решениям для реальных балочных конструкций достигается реализацией в расчете соответствующих граничных условий. При этом рассмотрены следующие типы задач:

Задача 1. Неизгибаемый элемент в плоскости "YOZ". Брус закреплен от поворота вокруг оси OY и загружен изгибающим моментом M_y и продольной силой N_z :

$$\chi_x = 0; \quad M_y = \text{var}; \quad N_z = \text{var}; \quad (4.23)$$

Искомыми величинами являются $M_x, \chi_y, \varepsilon_{oz}$.

В частном случае продольная сила может отсутствовать ($N_z = 0$).

Задача 2. Неизгибаемый элемент в плоскости “XOZ”. Брус закреплен от поворота вокруг оси OY и загружен изгибающим моментом M_y и продольной силой N_z :

$$\chi_y = 0; \quad M_x = \text{var}; \quad N_z = \text{var}. \quad (4.24)$$

Искомые величины - $M_y, \chi_x, \varepsilon_{oz}$.

Задача 3. Неизгибаемый элемент загружен продольной силой N_z :

$$\chi_y = 0; \quad \chi_x = 0; \quad N_z = \text{var}. \quad (4.25)$$

Искомые величины $M_x, M_y, \varepsilon_{oz}$.

Задача 4. Изгибаемый элемент в плоскостях “YOZ” и “XOZ” $M_y = \text{var}$;

$$M_x = \text{var}; \quad N_z = \text{var}. \quad (4.26)$$

Искомые величины - $\chi_y, \chi_x, \varepsilon_{oz}$.

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений по прочности и деформациям балок свидетельствуют об их удовлетворительной сходимости. При этом среднее отклонение расчетных величин от опытных значений составляет 8÷15%, а максимальные расхождения не превышают 28% в вершине диаграмм деформирования

Разработаны предложения по уточнению нормативных методов расчета трещиностойкости, деформаций и прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов из высокопрочных бетонов, в которых влияние перепадов температуры и влажности, продолжительности нагрева, уровня длительного предварительного обжата бетона учтено с помощью коэффициентов условий работы.

ВЫВОДЫ

По результатам исследований формулируются следующие основные выводы:

1. Получены экспериментальные данные о влиянии повышенных температур до 90°C и влажности до 80% на деформации и прочность высокопрочного бетона при осевом сжатии. Снижение призматической прочности высокопрочного бетона при осевом сжатии при кратковременного нагрева (воде) составляли соответственно 10%, 14%, 17% при температурах +50°C, +70°C, +90°C, по сравнению со значениями прочности при нормальной температуре, модуль упругости - 8%, 19%, 22%, предельная деформация сжатия увеличилась на 3%, 16%, 30%.
2. Получены экспериментальные данные о характеристиках деформаций ползучести высокопрочного бетона при уровнях длительного обжата $\eta_1 = \sigma_1/R_b = 0,2; 0,5$; в том числе в условиях воздействия повышенных до температур. Удельные деформации ползучести у

высокопрочного бетона для сопоставленных режимов нагружения и нагрева на 18÷40% ниже, чем у бетонов средней прочности.

3. Разработка рекомендаций в части учета влияния повышенных температур и влажности на характеристики физико-механических свойств высокопрочного бетона.

4. Количественные характеристики закономерностей деформирования и изменения прочности железобетонных элементов из высокопрочного бетона при внецентренном сжатии в условиях неравномерного нагрева.

5. Результаты теоретических исследований характеристик НДС из высокопрочного бетона при действии перепадов температуры, влажности и внецентренного сжатия с применением разработанного для ПЭВМ алгоритма с учетом выявленных особенностей изменения характеристик физико-механических свойств высокопрочных модифицированных бетонов свидетельствует об удовлетворительной сходимости расчетных величин с экспериментальными.

6. Выполнена оценка эффективности применения высокопрочного модифицированного бетона на примерах возведения конструкций колонн высотных зданий, подвергающихся воздействиям температурных и влажностных перепадов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Публикация «Влияние климатических условий Юго-Восточной Азии на прочность и модуль упругости бетона // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского 25-26 сентябрь 2019.

2. Корсун, В.И., Ха, В.К., Кхон, Х. Влияние органо-минерального модификатора на характеристики механических свойств высокопрочного бетона // Неделя науки СПбПУ, СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. - С. 119 – 121.

3. Khemarak Khon, Vladimir Korsun, Quynh Ha, Andrey Volkov. Effect of short-term heating up to +90°C on deformation and strength of high strength concrete. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering//EECE 2019: Proceedings of EECE 2019 pp 585-592..ю

4. V I Korsun, K Khon, V Q Ha, A O Baranov. Strength and deformations of high-strength concrete under short-term heating conditions up to + 90°C. International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering// MPCPE-2020:IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 896

Аспирант _____ Ха.В.К