

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПЕТРА ВЕЛИКОГО**

*На правах рукописи*

**КХОН КХЕМАРАК**

**ПРОЧНОСТЬ, ЖЕСТКОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ  
ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО  
ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ПРИ НЕСОВПАДЕНИИ ПЛОСКОСТЕЙ  
НАГРУЖЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПЕРЕПАДА**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

по результатам научно-квалификационной работы (диссертации)

Санкт-Петербург – 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

I. ВВЕДЕНИЕ .....	3
II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ .....	7
III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	25
IV. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ .....	27

## I. ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В последнее время возросли объемы строительства различных зданий и сооружений из железобетона в условиях жаркого и тропического климата. На территориях с жарким влажным климатом, как в Камбодже, так и в других странах, применяются в больших количествах такие бетонные и железобетонные конструкции. При проектировании и строительстве железобетонных конструкций для жаркого климата необходимо учитывать влияние на физико-механические свойства бетона влажности, температуры наружного воздуха и солнечной радиации, которые могут вызвать в конструкциях дополнительные усилия, раннее образование трещин в бетоне, чрезмерное их раскрытие, а также дополнительные деформации.

Недостаточная изученность характеристик свойств высокопрочных бетонов в условиях температурно-влажностных воздействия, отсутствие обоснованных нормативных методов расчета не позволяют достоверно оценивать влияние жаркого климата на железобетонные конструкции в процессе строительства и эксплуатации.

В России выполненные ранее экспериментальные исследования изгибаемых элементов из бетона проводились в нормальных температурно-влажностных условиях или в искусственных условиях, соответствующих по температуре и влажности характеристикам промышленных технологических сред. В то же время, в специальной литературе имеются весьма ограниченные данные по влиянию жаркого климата на напряженно-деформированное состояние конструкций, особенно из современных высокопрочных бетонов. Такое положение не позволяет в должной мере отразить влияние сезонных колебаний температуры и влажности, а тем более солнечной радиации на напряженно-деформированное состояние конструкций, что сдерживает применение конструкций из высокопрочного бетона. Поэтому актуальными задачами являются необходимость проведения экспериментально-теоретических исследований изгибаемых железобетонных

элементов из конструкционного высокопрочного бетона применительно к условиям тропического климата Камбоджи.

**Степень разработанности темы исследования.** Развитие методов расчета и применение железобетонных элементов из обычного тяжелого и высокопрочного бетона в условиях повышенных температур возможны благодаря работам таких ученых, как Б.А. Альтшулер, А.Я. Барашиков, П.И. Васильев, А.Ф. Милованов, В.И. Мурашев, И.Е. Прокопович, В.В. Жуков, А.П. Кричевский, М.Й. Коляков, В.И. Корсун, В.А. Косторниченко, В.В. Кардаков, Н.А. Невгень, В.Д. Передерей, В.Н. Самойленко, С.Л. Фомин, О.Э. Брыжатый, В.И. Веретенников и др.

Экспериментально-теоретические исследования НДС железобетонных конструкций в условиях температурных воздействий проведены в работах А.Ф. Милованова, К.Д. Некрасова, В. И. Корсуна, А.П. Кричевского, В.Н. Самойленко, С.Л. Фомина и др.

**Цель работы** – экспериментально-теоретические исследования влияния влажного и жаркого климата на прочность, жесткость и трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов из высокопрочного бетона при кратковременных нагрузках, а также разработка рекомендаций по расчету таких конструкций с учетом климатических особенностей Камбоджи.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели осуществлялось решение следующих задач:

1. Выполнены экспериментальные исследования зависимости характеристик физико-механических свойств высокопрочного бетона при осевом сжатии от температуры и влажности среды соответственно климатическим условиям Камбоджи.

2. Выполнены экспериментальные исследования характеристик напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов-балок из высокопрочного бетона при действии перепадов температуры.

3. Исследовать экспериментальными методами трещиностойкость, деформации и несущую способность балочных элементов из высокопрочного бетона при действии изгибающих моментов и неравномерного нагрева.

4. Исследовать теоретическими методами влияние перепадов температуры и влажности на напряженно-деформированное состояние конструкций каркасного многоэтажного здания применительно к климатическим условиям Камбоджи.

5. Разработать рекомендации по расчету изгибаемых железобетонных элементов из высокопрочного бетона применительно к условиям тропического климата Камбоджи.

**Объект исследования** – многоэтажные каркасные здания из высокопрочного бетона в условиях жаркого тропического климата.

**Предмет исследования** – характеристики механических свойств высокопрочного бетона в условиях повышенных температур, характеристики напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов конструкций при изгибе в условиях неравномерного нагрева.

**Научную новизну результатов работы составляют:**

1. Экспериментальные данные о влиянии повышенных до 90°C температур на характеристики физико-механических свойств высокопрочного бетона в части температурно-усадочных деформаций, прочности и деформационных свойств при осевом сжатии.

2. Экспериментальные данные о влиянии неравномерного нагрева и догружения изгибающим моментом на характеристики напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов-балок из высокопрочного бетона.

3. Экспериментальные данные о трещиностойкости, деформациях и несущей способности элементов-балок из высокопрочного бетона при действии возрастающих изгибающих моментов и перепадов температуры применительно к условиям жаркого и тропического климата.

4. Данные теоретических исследований о влиянии перепадов температуры и влажности на напряженно-деформированное состояние элементов конструкций перекрытий каркасного многоэтажного здания применительно к условиям тропического климата.

#### **Практическое значение результатов работы.**

1. Разработка рекомендаций по учету влияния температурно-влажностных условий тропического климата на характеристики физико-механических свойств высокопрочного бетона.

2. Разработка рекомендаций по применению высокопрочного бетона для несущих изгибаемых железобетонных элементов конструкций применительно к условиям тропического климата.

3. Внедрение результатов работы в практику проектирования.

#### **Методология и методы исследования**

1. Метод физического моделирования с применением теории подобия и механических методов испытания материалов нагружением и измерения перемещений.

2. Методы математического моделирования.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты определения влияния жаркого и тропического климата на характеристики физико-механических свойств высокопрочного бетона.

2. Результаты экспериментальных исследования о влиянии неравномерного нагрева на характеристики напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов из высокопрочного бетона.

3. Результаты экспериментальных исследований о трещиностойкости, деформациях и несущей способности элементов из высокопрочного бетона при действии возрастающих изгибающих моментов и перепадов температуры применительно к условиям жаркого и тропического климата.

**Степень достоверности результатов** обоснована применением базовых понятий сопротивления материалов, теории упругости, строительной механики,

математического анализа, а также общепринятых гипотез и допущений современной теории железобетона; подтверждена проведенными экспериментальными исследованиями изгибаемых элементов из высокопрочного бетона при неравномерном нагреве; обеспечена применением стандартных методов испытаний, использованием метрологически аттестованного испытательного оборудования и измерительных приборов.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях: Всероссийской научной-технической конференции «Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения» (2019 год, ВКА имени А.Ф.Можайского); International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering « Building Materials and Products» (2019 год, ЕЕСЕ-2019); International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering «Buildings and Structures in Civil and Structural Engineering» (2020 год, MPCPE-2020).

## II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Во *введении* сформулирована проблема и обоснована актуальность проводимого исследования, представлены степень разработанности, цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов и апробация работы.

В *первом разделе* изложены основные результаты в области исследования физико-механических свойств высокопрочных бетонов на основе ОМД, представлен обзор экспериментальных исследований закономерностей формирования микроструктуры бетонов, характеристик прочностных и деформативных свойств. Выполнен анализ результатов исследований характеристик НДС изгибаемых железобетонных конструкций в условиях нормальных и повышенных температур, в том числе для конструкций из высокопрочного бетона.

В работах В.Г. Батракова, М.Г. Булгаковой, Н.М. Зайченко, С.С. Каприелова, Ф.М. Иванова, Ф.А. Иссерса, А.В. Шейнфельда, А.А. Шишкина и других авторов получены достаточно полные данные о влиянии ОМД на формирование микроструктуры цементного камня, которые являются неотъемлемым компонентом современных высококачественных бетонов. Исследованы влияние и дозировки ОМД на характеристики бетонных смесей, степень гидратации вяжущего и формирование микроструктуры цементного камня модифицированных бетонов.

В работах В.Г. Батракова, В.Н. Вырового, Ф.А. Иссерса, Н.М. Зайченко, С.С. Каприелова, Е.Н. Кузнецова, Н.И. Карпенко, Ю.А. Климова, А.В. Корсуна, А.В. Шейнфельда, А.А. Шишкина, С. Galle, J. Sercombe, W.H. Dilger и др. представлены результаты исследований характеристик физико-механических свойств высокопрочных модифицированных бетонов на основе ОМД, а также деформаций усадки и ползучести при уровнях нагружения до уровня  $\eta_1=0.3$ . Отмечено, что ползучесть высокопрочных модифицированных бетонов недостаточно изучена для условий длительных нагружений высоких уровней, что сдерживает их широкое применение в строительстве.

В работах В.И. Веретенникова, А.Д. Журавского, В.И. Корсуна, В.А. Косторниченко, А.П. Кричевского, А.Ф. Милованова, К.Д. Некрасова, Н.А. Невгения, В.Д. Передеряя, В.Н. Самойленко, Н.И. Тупова, С.Л. Фомина и других исследователей получены не достаточно полные экспериментальные данные о влиянии повышенных до  $+90^\circ\text{C}$  температур на основные характеристики прочностных и деформативных свойств традиционных тяжелых бетонов средней прочности, а также на особенности формирования НДС железобетонных конструкций в условиях неравномерного нагрева с учетом неоднородности свойств материалов. Исследование влияния повышенных до  $+90^\circ\text{C}$  температур на температурно-усадочные деформации и характеристики физико-механических свойств высокопрочных модифицированных бетонов выполнены в работах А.В. Корсуна. Результаты исследований реализованы в виде практических

рекомендаций и аналитических выражений для учета влияния изученных факторов на характеристики прочностных и деформативных свойств бетона.

Особенности формирования НДС изгибаемых элементов из традиционного тяжелого и высокопрочного бетонов, в том числе в условиях неравномерного нагрева, а также методики расчета железобетонных конструкций с учетом неоднородности свойств материалов рассмотрены в работах С.В. Александровского, А.Н. Бамбуры, А.Я. Барашикова, П.И. Васильева, А.А. Гвоздева, А.Д. Журавского, Ю.А. Иванова, Н.И. Карпенко, Е.В. Клименко, С.Ф. Клованича, А.В. Корсуна, В.И. Корсуна, А.П. Кричевского, А.Ф. Милованова, Г.А. Молодченко, В.И. Мурашова, Н.А. Невгения, В.Н. Самойленко, С.Л. Фомина, А.Л. Шагина и др. показано, что НДС железобетонных элементов конструкций в значительной мере определяется величинами температуры и продолжительности нагрева, степенью неоднородности по объему конструкции прочностных, деформативных и реологических свойств бетона.

На основании анализа результатов исследований, представленных в литературных источниках, сформулированы цель и задачи исследования.

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

В качестве основного материала для экспериментальных исследований принят высокопрочный бетон, модифицированный с помощью органоминерального модификатора (ОММ), представленного в виде сухой смеси. Материалы: Портландцемент марки М500, песок кварцевый крупнозернистый Краснопалянского карьера ( $M_{кр}=2\div 2.5\text{мм}$ ), щебень гранитный фракции  $5\div 20\text{ мм}$  и модифицирующая добавка МБ10-50С в виде сухой смеси, при этом их соотношение составляло Ц:П:В = 1:1.61:0.29 при В/Ц=0.34 и ОК=18-25 см. Перемешивание бетонной смеси – в бетоносмесителе принудительного действия,

бетонирование – в горизонтальном положении без применения вибрирования.  
Выдерживание образцов в формах до распалубки – в течение одних суток.

Программа исследований включала две группы экспериментов:

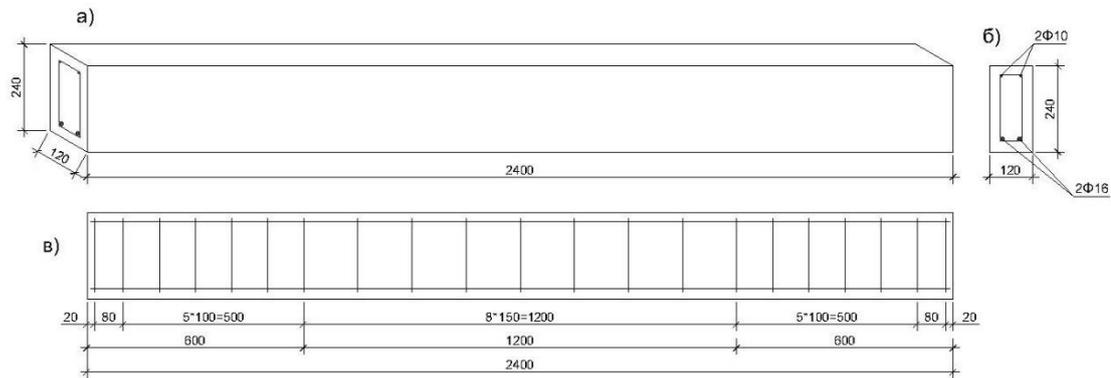
– методика экспериментальных исследований физико-механических свойств высокопрочного бетона.

– методика экспериментальных исследований характеристик напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов из высокопрочного бетона при неравномерном нагреве при температуре до  $+90^{\circ}\text{C}$ .

В качестве основных эталонных образцов для исследования характеристик свойств бетона приняты образцы-призмы размерами  $100\times 100\times 400$  мм. а также образцы-кубы с размерами ребер 100 мм. Количество серий бетонирования – 2.

По результатам испытаний бетонных образцов-призм определялись: температурно-усадочные деформации, призмная прочность  $R_b$ , начальный модуль упругости  $E_b$ , предельные деформации укорочения  $\bar{\varepsilon}_b$ .

Прочность и деформации изгибаемых железобетонных элементов из высокопрочного модифицированного бетона в условиях нормальной температуры и одностороннего нагрева до  $+90^{\circ}\text{C}$  исследовалась на балках с размерами  $120\times 240\times 2400$  мм, работающих по схеме однопролетной балки с двумя консолями. Продольное армирование опытных балок выполнено в растянутой зоне двумя стержнями  $\varnothing 16$  класса А-III, в противоположной зоне – два стержня  $\varnothing 10$  класса А-I (рис. 1). Поперечные стержни (хомуты) принимались из горячекатаной арматуры класса А-I диаметром 6.5 мм и устанавливались с шагом 100 мм на консольных участках балок и с шагом 150 мм в пролете.



**Рис. 1.** Конструкция (а), продольное армирование (б) и поперечное армирование (в) опытных образцов-балок.

Испытания железобетонных балок проводились в три этапа, соответствовавших характерным стадиям работы конструкций – стадии изготовления и набора прочности (этап 1), эксплуатации при длительном действии одностороннего нагрева до  $+90^{\circ}\text{C}$  (этап 2) и стадии последующего кратковременного догружения изгибающим моментом  $M_x$  до разрушения (этап 3).

Программа испытаний железобетонных балок представлена в табл. 1.

Таблица 1

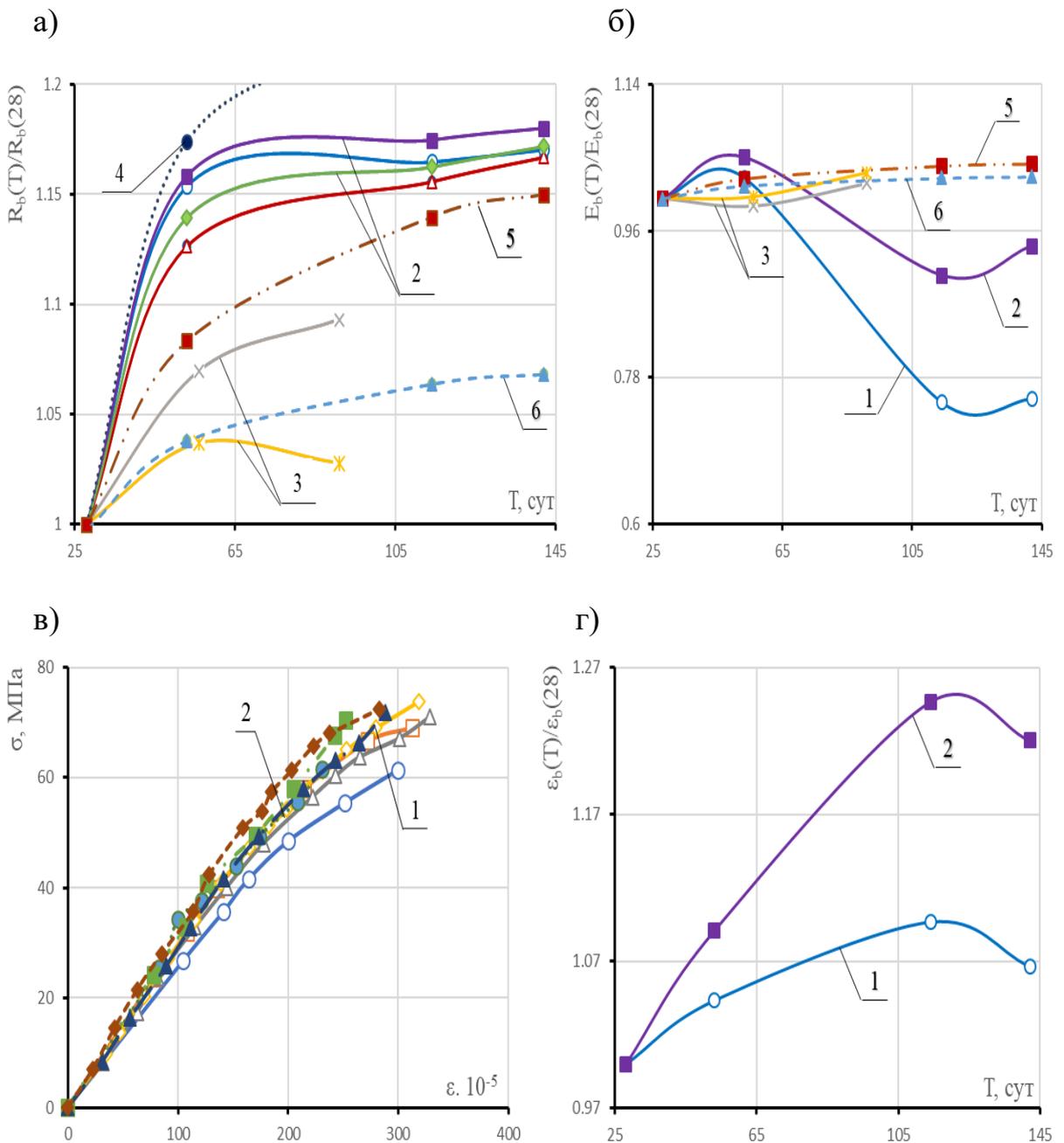
**Характеристика образцов-балок и условий испытания**

№ п/п серии	Характеристика образцов	t, сут	Количество образцов	
			Температура нагрева	
			20°C	90°C
1	Образцы-кубы			
	100×100×100 мм	14	4	-
		32	4	-
		60	4	-
		90	4	-
	Образцы-призмы			
	100×100×400 мм	32	2	-
		60	2	-
		90	2	-
	Балочные элементы			
120×240×2400 мм	30	2	-	
	45	-	2	

В *третьей* разделе представлены результаты экспериментальных исследований влияния кратковременного и длительного нагрева до  $+90^{\circ}\text{C}$  на

температурно-усадочные деформации, на характеристики прочностных и деформативных свойств высокопрочного модифицированного бетона при осевом сжатии.

Для модифицированного высокопрочного бетона исследованного состава значения призмной прочности составили порядка  $R_b = 75 \div 80$  МПа, коэффициента призмной прочности –  $K_{mn} \approx 0.7$ , начального модуля упругости при сжатии –  $E_b = 30 \div 40 \cdot 10^3$  МПа, предельной сжимаемости –  $\bar{\varepsilon}_b = 2.3 \div 2.5 \cdot 10^{-3}$  (Рис. 2).



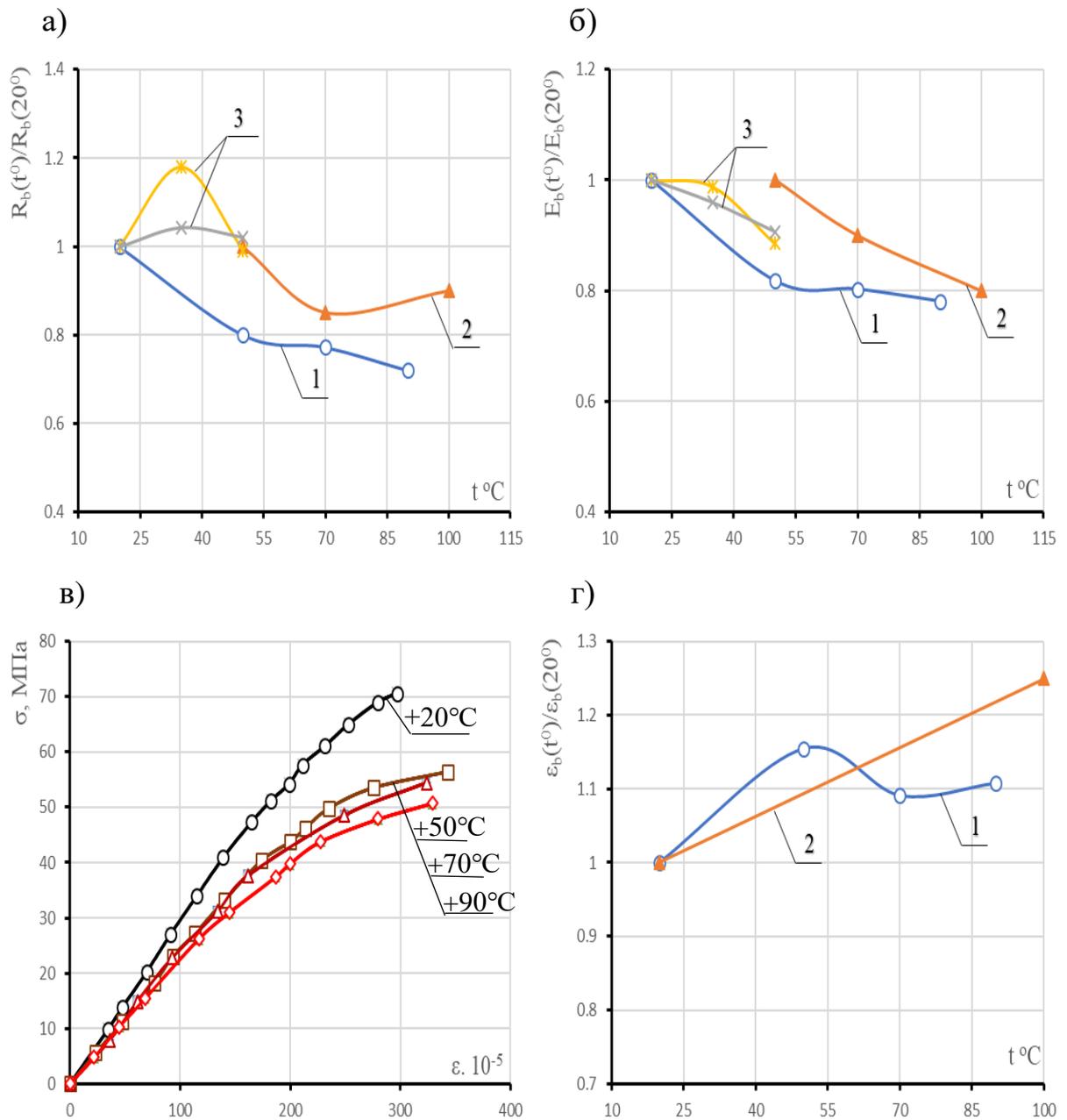
**Рис. 2.** Влияние возраста при нормальной температуре +20°C высокопрочного бетона на относительную прочность (а), начальный модуль упругости (б), диаграмму деформирования (в), и предельную сжимаемость (г).



Снижение призмочной прочности модифицированного высокопрочного бетона при осевом сжатии составило около 20%, 23%, 28% в условиях кратковременного нагрева соответственно при температурах +50°C, +70°C, +90°C по сравнению со значением прочности при нормальной температуре (Рис. 3а), начальной модуля упругости – 18%, 20%, 22% соответственно (Рис. 3б), предельная сжимаемость возросла соответственно на 15%, 9%, 11% (Рис. 3г).

Кривые деформирования высокопрочного бетона при осевом сжатии в диапазоне температур от 50°C до 90°C приведены на Рис. 3в. Уровни нагружения, соответствующие практически упругой деформации бетона в исследуемом температурном диапазоне, составляли почти 0.8 от прочности призм. Процесс упругого уменьшения объема высокопрочных бетонных образцов сменялся его увеличением (эффект дилатации) при уровнях нагружения выше 0.9R.

Изменения прочностных и деформационных свойств бетонов, подверженных воздействию повышенных температур, обусловлены проявлением деструктивных и конструктивных факторов в структуре бетона. Наиболее значимыми разрушающими факторами являются структурные напряжения в зоне контакта "матрица-заполнитель", которые в большинстве случаев проявляются при первом кратковременном нагреве крупнозернистых бетонов.



**Рис. 3.** Влияние кратковременного нагрева на прочность (а), начальный модуль упругости (б), диаграмму напряжение-деформация "σ-ε" (в) и предельную сжимаемость (г) высокопрочного модифицированного бетона при осевом сжатии

1 – по Корсун В.И., Кхон Кхемарак;

2 – по СП 27.13330.2017

3 – по M.F. Mohd Zain, S.S. Radin;

Структура аналитических выражений построена таким образом, что при вычислении характеристик прочности бетона при осевом сжатии  $R_{b,tem}$ , осевом растяжении  $R_{b,t}$  и начального модуля упругости  $E_{b,tem}$  условия работы бетона,

характеризующиеся температурой  $t^\circ$ , продолжительностью нагрева  $T$ , уровнем предварительного нагружения  $\eta$ , возрастом бетона к моменту нагрева  $\tau$ , скоростью нагружения  $v_\sigma$ , масштабным и другими факторами, учитываются с помощью функций<sup>1</sup>  $\gamma_{b,i}, \gamma_{t,i}, \beta_{b,i} (i = t^\circ, T, \eta, \tau, v_\sigma, m)$ :

$$R_{b,tem}(t^\circ, T, \eta, \tau, v_\sigma, m) = R_b \cdot \gamma_{bt} \cdot \gamma_{b,\eta} \cdot \gamma_{b,\tau} \cdot \gamma_{bm}; \quad (1)$$

$$R_{bt,t}(t^\circ, T, \eta, \tau, v_\sigma, m) = R_{bt} \cdot \gamma_{tt} \cdot \gamma_{t,\eta} \cdot \gamma_{t,\tau} \cdot \gamma_{tm}; \quad (2)$$

$$E_{b,tem}(t^\circ, T, \eta, \tau, v_\sigma, m) = E_b \cdot \beta_b \cdot \beta_\eta \cdot \beta_\tau \cdot \beta_m; \quad (3)$$

Для стандартных испытаний предварительно ненагруженного бетона ( $\eta = 0$ ) при  $t_0^\circ = +20^\circ C$  в возрасте  $\tau_0 = 28 \text{сут}$  значения функций  $\gamma_{b,i}, \gamma_{t,i}, \beta_{b,i}$  автоматически приравниваются единице.

Структура выражений (1)÷(3), построенная на условии отдельного и независимого учета основных значимых факторов, является приближенной, поскольку учитываемые факторы взаимосвязаны, проявляются одновременно и их отдельное определение является достаточно сложной задачей, требующей постановки большого объема специальных экспериментов. Очевидным достоинством такого подхода является четкий физический смысл функций условий работы, позволяющий достаточно гибко учитывать конкретные особенности эксплуатации конструкций.

Выражения функций  $\gamma_{bt}, \gamma_{tt}, \beta_b$  влияния температуры  $t^\circ$  и продолжительности нагрева  $T$  на характеристики прочности и модуля упругости бетона в условиях воздействия повышенных температур по структуре в работе<sup>1</sup> приняты с отдельной аппроксимацией функций, отражающих преимущественно деструктивные процессы (функции  $F_1, F_2, F_3$ ) в структуре бетона при кратковременном нагреве и преимущественно конструктивные процессы (функции  $F_4, F_5, F_6$ ) при длительном нагреве:

$$\gamma_{bt} = [1 - F_1 + F_4 \cdot F_b(t^\circ, T)]; \quad (4)$$

<sup>1</sup> Корсун В.И. Напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций в условиях температурных воздействий. – Макеевка: ДонГАСА, 2003. – 153 с.

$$\gamma_{tt} = [1 - F_2 + F_5 \cdot F_{br}(t^\circ, T)]; \quad (5)$$

$$\beta_b = [1 - F_3 + F_6 \cdot F_b(t^\circ, T)]; \quad (6)$$

где  $F_b(t^\circ, T)$  и  $F_{br}(t^\circ, T)$  – функции, учитывающие скорость приращения соответствующих значений прочности и модуля упругости при длительном нагреве, принимаемые согласно предложениям.

Для функций  $F_1, \dots, F_6$  учет их неоднозначной изменчивости в отдельных диапазонах температур оказался возможным при применении однотипных выражений в виде<sup>1</sup>:

$$F_i = a_i \cdot (t^\circ - 20^\circ)^3 + b_i \cdot (t^\circ - 20^\circ)^2 + c_i \cdot (t^\circ - 20^\circ); \quad (i = 1, 2, \dots, 6) \quad (7)$$

Значения коэффициентов  $a_i, b_i, c_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ , подобранные из условия лучшего соответствия опытным данным, приняты равными:

$$\begin{aligned} a_1 &= 2,7 \cdot 10^{-7}; & b_1 &= -9,5 \cdot 10^{-5}; & c_1 &= 9,8 \cdot 10^{-3}; \\ a_2 &= 3,25 \cdot 10^{-7}; & b_2 &= -1,16 \cdot 10^{-4}; & c_2 &= 1,2 \cdot 10^{-2}; \\ a_3 &= 1,3 \cdot 10^{-7}; & b_3 &= -5,8 \cdot 10^{-5}; & c_3 &= 8 \cdot 10^{-3}; \\ a_4 &= 1,7 \cdot 10^{-7}; & b_4 &= -5,5 \cdot 10^{-5}; & c_4 &= 5,55 \cdot 10^{-3}; \\ a_5 &= 1,95 \cdot 10^{-7}; & b_5 &= -7,7 \cdot 10^{-5}; & c_5 &= 7,7 \cdot 10^{-3}; \\ a_6 &= 1,05 \cdot 10^{-7}; & b_6 &= -3,3 \cdot 10^{-5}; & c_6 &= 2,2 \cdot 10^{-3}; \end{aligned} \quad (8)$$

Предельные деформации бетона при осевом сжатии  $\varepsilon_{u,tem}$  и осевом растяжении  $\varepsilon_{u,t}$  в условиях нагрева с достаточной точностью могут определяться в зависимости от соответствующих характеристик  $\varepsilon_u$  и  $\varepsilon_{ut}$  в условиях нормальной температуры из следующих соотношений:

$$\varepsilon_{u,tem} = \varepsilon_u \cdot \frac{\gamma_{br}}{\beta_b}; \quad \varepsilon_{u,t} = \varepsilon_{ut} \cdot \frac{\gamma_{tt}}{\beta_b}; \quad (9)$$

В *четвертой разделе* представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния кратковременного одностороннего нагрева на характеристики НДС изгибаемых железобетонных элементов из высокопрочного модифицированного бетона с учетом неоднородности прочностных и деформативных свойств материалов по объему конструкций, а также результаты

исследований НДС конструкций несущих перекрытий многоэтажных зданий с целью оценки эффективности применения высокопрочных бетонов для их возведения.

В экспериментальной части исследований испытания железобетонных балок проводились в три этапа, соответствовавших характерным стадиям работы конструкций.

Величины реактивных моментов при одностороннем нагреве балок определялись, главным образом величиной температурного градиента в плоскости действия неравномерного одностороннего нагрева, физико-механическими и реологическими свойствами высокопрочного модифицированного бетона, изменения которых при нагреве носят сложный нелинейный характер. Так с повышением температуры нагрева в бетоне кроме температурных деформаций возникают деформации деструктивного характера, снижается модуль упругости, более интенсивно протекают деформации усадки и ползучести, развитие которых по высоте сечения развиваются неравномерно и с разной скоростью, что приводит к релаксации температурных усилий с течением времени.

В теоретической части исследований определение характеристик НДС изгибаемых 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.

Принятая расчетная модель основывается на следующих предпосылках расчета. Рассматривается железобетонный элемент прямоугольного сечения с размерами  $a \times b$  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 направлении плоскости теплового потока перпендикулярно продольной оси элемента и относительно главных произвольной ориентации осей нормального

сечения элемента. Полагается, что элемент может свободно удлиняться вдоль осей "X" и "Y", то есть,  $\sigma_x = 0, \sigma_y = 0$ .

Механические характеристики бетона и арматуры принимаются функциями температуры. Сечение элемента с неоднородными свойствами представляется в виде системы элементарных участков площадью  $dF = dx \times dy$  (Рис. 4). Полагается, что в пределах элементарного участка напряжение  $\sigma_{z,ji}$  температура бетона и его физико-механические свойства постоянны и равны их значениям в центре тяжести участка.

Физические соотношения, связывающие внутренние усилия и деформации на уровне срединной оси стержневого элемента конструкции, получаются 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:

$$\varepsilon_{b,ji} = \frac{\sigma_{z,ji}}{E_{b,ji}} + \alpha_{bt,ji} \cdot \Delta t_{b,ji} + \varepsilon_{cs,ji} + \varepsilon_{c,ji}; \quad (10)$$

где  $\varepsilon_{b,ji}$  – модуль деформации участка бетона с координатами по сечению  $x_{ji}, y_{ji}$ :  $E_{b,ji} = E_b \cdot \beta_{b,ji}$ .

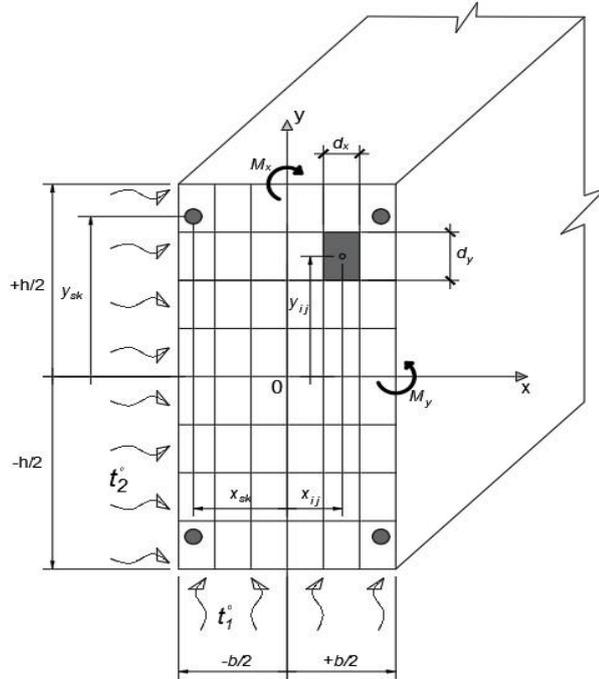
Полная деформация  $k$ -ого арматурного стержня  $\varepsilon_{s,k}$  складывается из составляющих, обусловленных действием напряжения  $\sigma_{s,k}$  и температурного расширения  $\alpha_{st,k} \cdot \Delta t_{s,k}$ :

$$\varepsilon_{s,k} = \frac{\sigma_{s,k}}{E'_{s,k}} + \alpha_{st,k} \cdot \Delta t_{s,k}; \quad (11)$$

Из соотношений (10)÷(11) выражения для напряжений в  $ji$ -ом участке бетона  $\sigma_{z,ji}$  и  $k$ -ом арматурном стержне  $\sigma_{s,k}$  записываются следующим образом:

$$\sigma_{z,ji} = E_{b,ji} \cdot (\varepsilon_{b,ji} - \alpha_{bt,ji} \cdot \Delta t_{b,ji} - \varepsilon_{cs,ji} - \varepsilon_{c,ji}); \quad (12)$$

$$\sigma_{s,k} = E'_{s,k} \cdot (\varepsilon_{s,k} - \alpha_{st,k} \cdot \Delta t_{s,k}); \quad (13)$$



**Рис. 4.** Расчетная модель балочного элемента с неоднородными свойствами.

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

$$E'_{s,k} = E_{s,k} \cdot \frac{\beta_{s,k}}{K_{s,k}}; \quad (14)$$

В выражениях (11)÷(14):

$\alpha_{st,k}$  – коэффициент температурного расширения  $k$ -ого арматурного стержня;

$\beta_{s,k}$  – коэффициент, учитывающий изменение модуля упругости арматуры при нагреве, принимаемый согласно СП 27.13330.2017;

$E_{s,k}$  – модуль упругости  $k$ -ого 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;

$\psi_s$  – 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:

$$\begin{aligned} M_x &= \int_{-h/2-b/2}^{+h/2+b/2} \int \sigma_{z,ji} \cdot d_x \cdot d_y \cdot y_{ji} + \sum_{k=1}^{n_s} \sigma_{s,k} \cdot f_{s,k} \cdot y_{s,k}; \\ N_z &= \int_{-h/2-b/2}^{+h/2+b/2} \int \sigma_{z,ji} \cdot d_x \cdot d_y + \sum_{k=1}^{n_s} \sigma_{s,k} \cdot f_{s,k}; \end{aligned} \quad (15)$$

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  $k$ -ого арматурного стержня;

$f_{s,k}$  – площадь поперечного сечения  $k$ -ого арматурного стержня;

Подставляя в формулы (15) выражения (12)÷(14), и принимая справедливой гипотезу плоских сечений:

$$\varepsilon_{b,ji} = \varepsilon_{oz} + \chi_x \cdot y_i + \chi_y \cdot x_j; \quad (16)$$

Получаем искомые физические соотношения, которые могут быть представлены в более компактной форме, если осуществим группировку членов, содержащих продольные относительные деформации элемента  $\varepsilon_{oz}$  на уровне срединной оси и кривизны  $\chi_x, \chi_y$  относительно осей X и Y:

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ N_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \chi_x \\ \chi_y \\ \varepsilon_{oz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_{ox} \\ M_{oy} \\ N_{oz} \end{pmatrix} \quad (17)$$

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

$$A_1 = \int_{-h/2-b/2}^{+h/2+b/2} \int E_b \cdot d_x \cdot d_y \cdot y_i^2 + \sum_{k=1}^{n_s} y_{s,k}^2 \cdot f_{s,k} \cdot E'_{s,k}; \quad (18)$$

$$B_1 = \int_{-h/2-b/2}^{+h/2+b/2} \int E_b \cdot d_x \cdot d_y \cdot x_i \cdot y_i + \sum_{k=1}^{n_s} x_{s,k} \cdot y_{s,k} \cdot f_{s,k} \cdot E'_{s,k}; \quad (19)$$

$$C_1 = \int_{-h/2-b/2}^{+h/2+b/2} \int E_b \cdot d_x \cdot d_y \cdot y_i + \sum_{k=1}^{n_s} y_{s,k} \cdot f_{s,k} \cdot E'_{s,k}; \quad (20)$$

$$B_2 = \int_{-h/2-b/2}^{+h/2+b/2} \int E_b \cdot d_x \cdot d_y \cdot x_i^2 + \sum_{k=1}^{n_s} x_{s,k}^2 \cdot f_{s,k} \cdot E'_{s,k}; \quad (21)$$

$$C_2 = \int_{-h/2-b/2}^{+h/2+b/2} \int E_b \cdot d_x \cdot d_y \cdot x_i + \sum_{k=1}^{n_s} x_{s,k} \cdot f_{s,k} \cdot E'_{s,k}; \quad (22)$$

$$C_3 = \int_{-h/2-b/2}^{+h/2+b/2} \int E_b \cdot d_x \cdot d_y + \sum_{k=1}^{n_s} f_{s,k} \cdot E'_{s,k}; \quad (23)$$

$$A_2 = B_1; \quad A_3 = C_1; \quad B_3 = C_2; \quad (24)$$

$$M_{ox} = \int_{-h/2-b/2}^{+h/2+b/2} \int E_{b,ji} \cdot y_i \cdot (\alpha_{bt,ji} \cdot \Delta t_{ji} + \varepsilon_{cs,ji} + \varepsilon_{c,ji}) \cdot d_x \cdot d_y - \sum_{k=1}^{n_s} y_{s,a} \cdot f_{s,a} \cdot \alpha_{s,a} \cdot \Delta t_{s,a} \cdot E'_{s,k}; \quad (25)$$

$$M_{oy} = \int_{-h/2-b/2}^{+h/2+b/2} \int E_{b,ji} \cdot x_i \cdot (\alpha_{bt,ji} \cdot \Delta t_{ji} + \varepsilon_{cs,ji} + \varepsilon_{c,ji}) \cdot d_x \cdot d_y - \sum_{k=1}^{n_s} x_{s,a} \cdot f_{s,a} \cdot \alpha_{s,a} \cdot \Delta t_{s,a} \cdot E'_{s,k}; \quad (26)$$

$$M_{oz} = \int_{-h/2-b/2}^{+h/2+b/2} \int E_{b,ji} \cdot (\alpha_{bt,ji} \cdot \Delta t_{ji} + \varepsilon_{cs,ji} + \varepsilon_{c,ji}) \cdot d_x \cdot d_y - \sum_{k=1}^{n_s} f_{s,a} \cdot \alpha_{s,a} \cdot \Delta t_{s,a} \cdot E'_{s,k}; \quad (27)$$

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  $\Delta x$  и  $\Delta y$ .

Участки рассматриваются как 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 (18)÷(27) заменяются квадратурными формулами.

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

$$\sigma_{z,ji} \leq R_{bt,tem,ji}; \quad \varepsilon_{z,ji} \leq \varepsilon_{zu,ji}; \quad (28)$$

Полагается:

$$E'_{b,ji} = E_{ji}; \quad (29)$$

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

$$\varepsilon_{zu,ji} = \frac{2 \cdot R_{bt,tem,ji}}{\beta_{b,ji} \cdot E_b}; \quad (30)$$

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

$E_{ji}$  – модуль упругопластичности  $ji$ -го участка бетона.

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

$$E'_{b,ji} = 0 \quad (31)$$

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.** Брус закреплен от поворота вокруг оси “OX” и загружен изгибающим моментом  $M_y$  и продольной силой  $N_z$ :

$$\chi_x = 0; \quad M_y = \text{var}; \quad N_z = \text{var}. \quad (32)$$

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

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

**Задача 2.** Брус закреплен от поворота вокруг оси “OY” и загружен изгибающим моментом  $M_x$  и продольной силой  $N_z$ :

$$\chi_y = 0; \quad M_y = \text{var}; \quad N_z = \text{var}. \quad (33)$$

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

**Задача 3.** Неизгибаемый элемент загружен продольной силой  $N_z$ :

$$\chi_y = 0; \quad \chi_x = 0; \quad N_z = \text{var}. \quad (34)$$

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

**Задача 4.** Неоднородный элемент нагружен силами:

$$M_y = \text{var}; \quad M_x = \text{var}; \quad N_z = \text{var}. \quad (35)$$

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

При заданных граничных условиях (32)÷(35) уравнения статического равновесия (17) удовлетворяются и искомые величины для каждого типа задач находятся из решения системы уравнений (17).

Решение физически нелинейной задачи осуществляется методом упругих решений в сочетании с шаговым методом приращения температурной и силовой нагрузки.

Коэффициент  $\psi_s$  в принятой расчетной модели неоднородного железобетонного элемента вычислялся для каждого арматурного стержня отдельно как для железобетонного элемента площадью поперечного сечения, равной суммарной площади участков, пересеченных трещиной, и работающего в условиях одноосного напряженного состояния, приведенного к однородному по его сечению;

$$\psi_s = 1 - b \cdot \frac{N_{b,crc,z}}{N_{z,k}} \leq 1; \quad (36)$$

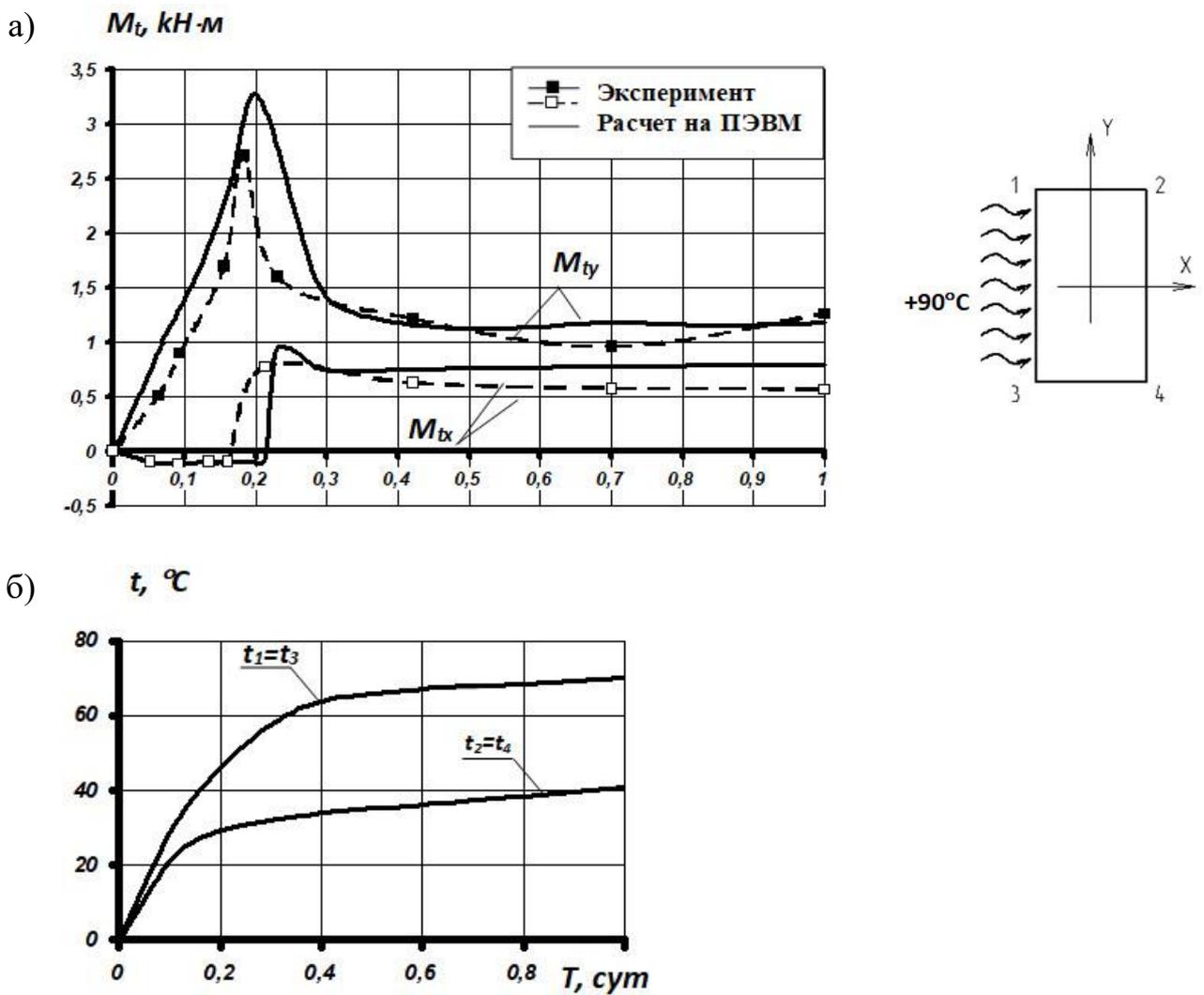
$$N_{b,crc,z} = \sum_{i=1}^m \bar{\sigma}_{b,i,x} \cdot dx_i \cdot dy_i; \quad (37)$$

$$N_{s,k} = \sigma_{s,k} \cdot f_{s,k}; \quad (38)$$

где:  $b$  – коэффициент, принимаемый равными при кратковременном действии температуры ( $T \leq 1$  сут) и нагрузки – 0.7; при длительном действии температуры и нагрузки – 0.35;  $m$  – количество участков бетонного сечения,

пересеченных трещиной и окружающих рассматриваемый арматурный стержень;  
 $\bar{\sigma}_{b,i,x}$  – предельное значение напряжения растяжения на  $i$ -том участке бетона в момент образования трещин, определяемое по условию (28);  $\sigma_{s,k}$  – величина напряжения в арматуре  $S_k$ , вычисляемая по формуле (13) при значении  $\psi_s$ , определенном на предыдущей итерации.

Результаты расчетного определения моментов от неравномерного нагрева, деформаций продольной оси элементов при заданных значениях температурных перепадов представлены на рис. 5÷7.



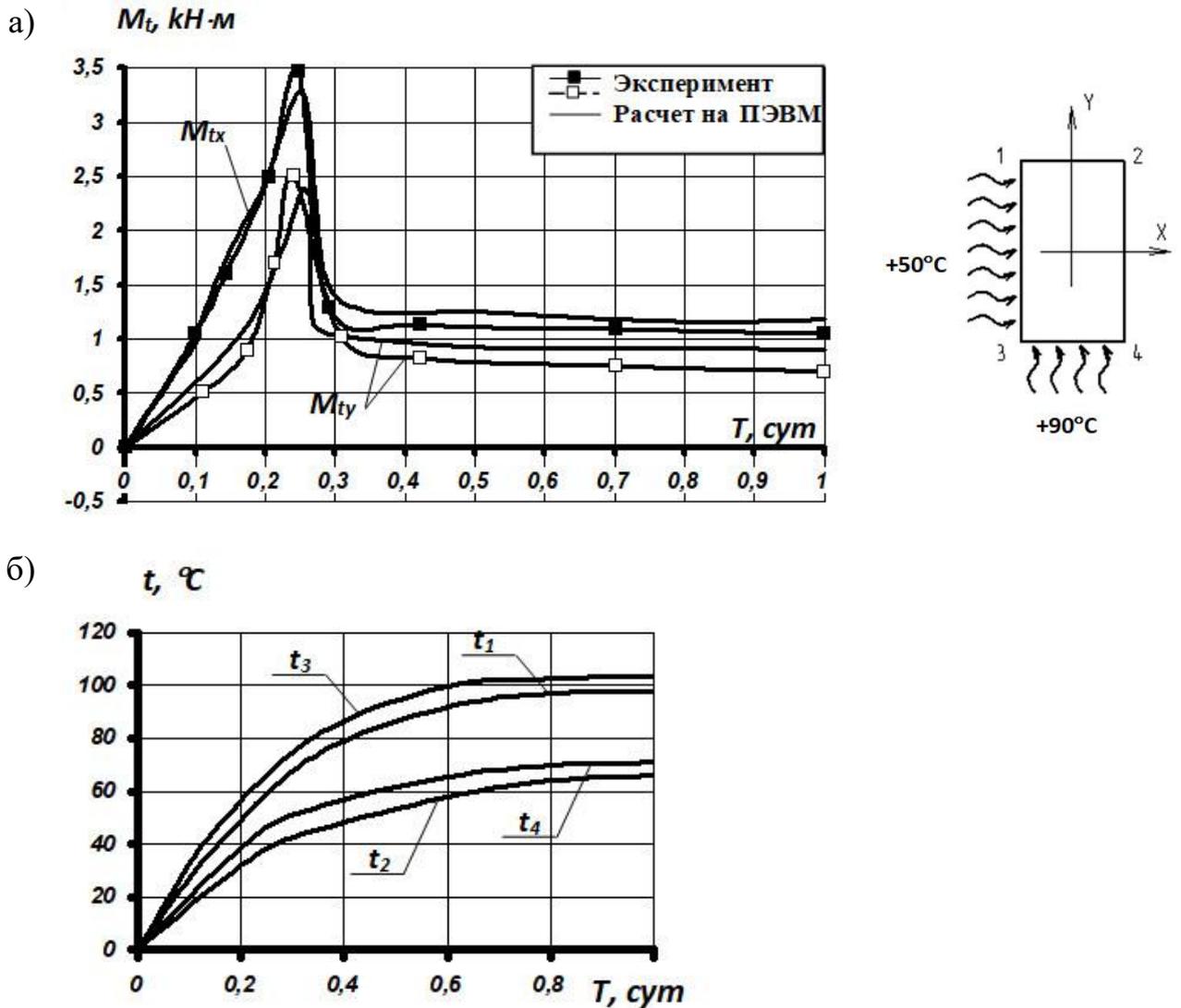


Рис. 6. Изменение температурных моментов  $M_{tx}$  и  $M_{ty}$  при неравномерном нагреве и несовпадении плоскостей нагружения балок (а) и значения температуры в угловых точках сечения (б).

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований формулируются следующие основные выводы:

1. Получены экспериментальные данные о характеристиках физико-механических свойств высокопрочного модифицированного бетона класса по прочности В80 при осевом сжатии в условиях нормальной температуры.
2. Получены экспериментальные данные о влиянии повышенных до  $+90^{\circ}\text{C}$  температур на значения прочности, начального модуля упругости, предельной

сжимаемости при осевом сжатии бетона. Кратковременный нагрев в исследованном диапазоне температур приводит к снижению прочности высокопрочного бетона на величину до 23%.

3. Уточнен состав ВПБ для экспериментальных исследований. Выполнены 2 серии экспериментальных исследований прочности и деформаций образцов из высокопрочного бетона в условиях кратковременного нагрева до +900С.

4. Разработаны методики и программа экспериментальных исследований влияния неравномерного нагрева на характеристики напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов. Разработано и изготовлено оборудование для экспериментальных исследований.

5. Получены данные экспериментальных и теоретических исследований о влиянии одностороннего нагрева на характеристики НДС изгибаемых железобетонных элементов конструкций из высокопрочного модифицированного бетона.

6. Выполнены теоретические исследования влияния перепадов температуры в несовпадающих плоскостях на трещиностойкость, деформации и прочность изгибаемых балочных элементов.

7. Принято участие с докладами в работе научно-технических конференции: в академии им. А.Ф. Можайского; в СПбПУ; ЕЕСЕ-2019 и МРСРЕ-2020.

8. Результаты работы опубликованы в 4-х научных статьях.

9. Разработаны практические рекомендации по учету температуры и длительности нагрева на величины расчетных характеристик прочностных и деформационных свойств при кратковременном нагружениях.

#### **IV. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Корсун, В.И. Влияние климатических условий Юго-Восточной Азии на прочность и модуль упругости бетона [Текст] / В.И. Корсун, К. Кхон, В. К. Ха // Труды военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2019.

2. Корсун, В.И. Effect of short-term heating up to +90°C on deformation and strength of high-strength concrete [Текст] / В.И. Корсун, К. Кхон, В. К. Ха // In: Anatolijs B., Nikolai V., Vitalii S. (eds) Proceedings of EECSE 2019. EECSE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 70. Springer, Cham.

3. Цю, Дж. Effect of physical and chemical properties of coal gangue under different geological conditions on mechanical properties of concrete [Текст] / Дж. Цю, Ю. Чжоу, Б. Хоу, С. Султанов, К. Кхон // In: Anatolijs B., Nikolai V., Vitalii S. (eds) Proceedings of EECSE 2019. EECSE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 70. Springer, Cham.

4. Корсун, В.И. Влияние органо-минерального модификатора на характеристики механических свойств высокопрочного бетона [Текст] / В.И. Корсун, К. Кхон, В. К. Ха // Неделя Науки СПбПУ. – 2019.

5. Корсун, В.И. Strength and deformations of high-strength concrete under short-term heating conditions up to + 90°C [Текст] / В.И. Корсун, К. Кхон, В. К. Ха // International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (MPCPE-2020). – 2020.

6. Цю, Дж. Damage constitutive model of coal gangue concrete under freeze-thaw cycles [Текст] / Дж. Цю, Ю. Чжоу, Н.И. Ватин, С. Гуань, С. Султанов, К. Кхон // Construction and Building Materials. – 2020.