

ТЕРМИЧЕСКАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ЖЁСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ОДНОСТОРОННЕМ НАГРЕВЕ СО СТОРОНЫ РАСТЯНУТОЙ ЗОНЫ

В. С. Федоров, В. Е. Левитский, Е. А. Исаева

Федоров Виктор Сергеевич, академик Российской академии архитектуры и строительных наук; доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (РУТ), г. Москва, Российская Федерация, e-mail: fvs_skzs@mail.ru;

Левитский Валерий Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (РУТ), г. Москва, Российская Федерация;

Исаева Екатерина Андреевна, студентка, Российский университет транспорта (РУТ), г. Москва, Российская Федерация

Изложена методика и результаты определения изгибной жёсткости неравномерно нагретого плоского железобетонного элемента на основе деформационной модели нормальных сечений. Снижение прочностных и деформативных характеристик материалов, нелинейные диаграммы деформирования и температурные профили по сечению описываются единичными экспоненциальными зависимостями при наименьшем количестве опытных параметров. На фактическом числовом примере показано, что температурная деградация механических свойств бетона и арматуры существенно влияет на снижение жёсткости лишь в первые 20 минут нагрева по стандартному режиму, а также после наступления текучести в растянутой арматуре. Полученные по предлагаемой методике жёсткостные характеристики могут быть непосредственно использованы для расчёта прогибов, а также для анализа перераспределения усилий в статически неопределимых балочных конструкциях в процессе нестационарного высокотемпературного нагрева, характерного для условий пожара.

Ключевые слова: изгибная жёсткость, диаграмма «момент – кривизна», неравномерный нагрев, температурные деформации, свободная тепловая кривизна, деформационная модель, огнестойкость.

THERMAL DEGRADATION OF RIGID CHARACTERISTICS OF BENDING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER NON-STATIONARY ONE-SIDE HEATING FROM THE STRETCHED ZONE SIDE

V. S. Fedorov, V. Ye. Levitskiy, Ye. A. Isaeva

Fedorov Viktor Sergeyevich, Academician of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences; Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Structures, Buildings and Structures, Russian University of Transport (RUT), Moscow, Russian Federation, e-mail: fvs_skzs@mail.ru;

Levitskiy Valeriy Yevgenyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures, Buildings and Structures, Russian University of Transport (RUT), Moscow, Russian Federation;

Isaeva Yekaterina Andreevna, student, Russian University of Transport (RUT), Moscow, Russian Federation

The technique and results of determining the flexural stiffness of a non-uniformly heated flat reinforced concrete member based on a deformation model of normal cross-sections are presented. Reducing the strength and strain characteristics of materials, non-linear deformation curves and temperature profiles along the cross section with exponential dependences with the smallest number of experimental parameters. The actual numerical example shows that the temperature degradation of the mechanical properties of concrete and reinforcement significantly affects the reduction in stiffness only in the first 20 minutes of heating according to the standard fire, as well as after the onset of yield in tension reinforcement. The important characteristics obtained by the proposed rigorous method can be used to calculate deflections, as well as to analyze the redistribution of results in finished indeterminate beam structures in the process of non-stationary high-temperature heating, which is typical for fire conditions.

Keywords: flexural stiffness, moment-curvature diagram, non-uniform heating, thermal strain, free thermal curvature, fire resistance.

Развитие температурного поля по сечению железобетонных конструкций в результате резкорезимного теплового воздействия, характерного для условий пожара, приводит к деградации механических свойств бетона и арматуры. Все это неизбежно сказывается на прочности и жёсткостных характеристиках элементов. Наличие надёж-

ных данных о температурных деформациях в соотношении жёсткостных характеристик элементов в процессе нестационарного нагрева особенно необходимо для расчёта статически неопределимых конструкций, в которых указанные факторы приводят к перераспределению внутренних усилий и существенно влияют на время сопротивления воздействию температуры [1, 2].

Известен ряд примеров конечно-элементного моделирования в универсальных программных комплексах отдельных конструкций и несущих систем зданий при нестационарном резкорезимном нагреве [3, 4]. Однако такие расчёты ещё долгое время будут практически реализуемы только в исследовательских целях, поскольку требуют наличия мощной вычислительной техники, коммерчески доступного программного обеспечения, высокой квалификации расчётчика и надёжного эталонного результата, на основе которого будет осуществляться калибровка параметров расчётной модели. Необходима разработка инженерно-адаптированных методов анализа термосилового сопротивления и оценки огнестойкости железобетонных конструкций и несущих систем, учитывающих нелинейную термическую деградацию жёсткостных характеристик и прочности элементов.

Наиболее простым и удобным способом оценки жёсткостных характеристик является анализ напряжённо-деформированного состояния железобетонного элемента на основе деформационной модели нормальных сечений. При этом варианты деформационной модели, изложенные в прежних редакциях нормативных документов по расчёту огнестойкости железобетонных конструкций (МДС 21.2-2000 и СТО 36554501-006-2006), основывались на упрощённых двухлинейных диаграммах деформирования материала, не учитывали температурные изменения, и, очевидно, не были предназначены для определения жёсткостных характеристик элементов. В наиболее новой редакции нормативного документа (СП 468.1325800.2019) упоминание о деформационной модели отсутствует вовсе.

В зарубежных публикациях описывается возможность применения деформационной модели для оценки огнестойкости неравномерно нагреваемых железобетонных конструкций [5–7], но уделено мало внимания особенностям термической деградации жёсткостных характеристик элементов в них; в России же такие исследования практически не проводились.

В данной работе показано как с использованием деформационной модели термосилового сопротивления при минимальном количестве нормируемых параметров определить деформации свободного температурного изгиба и изменение изгибной жёсткости элемента в наиболее простом и распространённом случае – при нагреве железобетонного элемента со стороны растянутой зоны в условиях поперечного изгиба в одной плоскости.

В качестве объекта исследования выбрана испытанная в работе [8] плоская железобетонная плита, работающая по балочной схеме. Высота сечения плиты 150 мм, ширина 1900 мм; прочность бетона при сжатии 53,8 МПа, при растяжении – 5,45 МПа, модуль упругости бетона 39 800 МПа,

пиковые деформации при сжатии 0,25 %, при растяжении – 0,02 %; плотность бетона 2393 кг/м³; армирование растянутой зоны – 18 стержней диаметром 10 мм класса А400 с защитным слоем (до грани стержня) 30 мм.

Для снижения прочности и начального модуля деформаций бетона при нагреве предлагаются зависимости [9]:

$$\begin{aligned} \gamma_{b,ti} &= \exp \left[-\gamma \cdot \left(\frac{t_{b,i} - 20}{1000} \right)^m \right]; \\ \beta_{b,ti} &= \exp \left[-\beta \cdot \left(\frac{t_{b,i} - 20}{1000} \right)^n \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где $t_{b,i}$ – температура нагрева бетона, °С; γ, m, β, n – опытные параметры, полученные для условий нагрева в нагруженном состоянии; для рассматриваемого вида бетона $\gamma = 2,6, m = 4, \beta = 3, n = 0,6$.

Уравнение связи напряжений и деформаций бетона при сжатии:

$$\sigma_{b,i} = E_{b,ti} \cdot v_{b,i} \cdot \varepsilon_{b,i}, \quad (2)$$

где $v_{b,i}$ – коэффициент секущего модуля:

$$\begin{aligned} v_{b,i} &= \exp \left[-k_{b,ti} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{b,i}}{\varepsilon_{bu,ti}} \right)^{1/k_{b,ti}} \right]; \\ k_{b,ti} &= -\ln(v_{bu,ti}); \end{aligned} \quad (3)$$

$$E_{b,ti} = E_b \cdot \beta_{b,ti}; \quad \varepsilon_{bu,ti} = \frac{\varepsilon_{bu}}{\beta_{b,ti}};$$

$$v_{bu,ti} = v_{bu} \cdot \gamma_{b,ti}, \quad (4)$$

$\varepsilon_{bu,ti}$ – предельные деформации в вершине диаграммы; $v_{bu,ti}$ – соответствующий им предельный коэффициент секущего модуля.

Аналогичными зависимостями описывается поведение бетона при растяжении. Максимальные деформации бетона ограничиваются вершиной диаграммы; при сжатии максимальный уровень деформаций на нисходящей ветви не ограничивается.

Температурные деформации бетона:

$$\varepsilon_{b,ti}^{(t)} = \varepsilon_\alpha \cdot \left[1 - \exp \left[-\alpha \cdot \left(\frac{t_{b,i} - 20}{1000} \right)^p \right] \right], \quad (5)$$

где $\alpha, p, \varepsilon_\alpha$ – опытные параметры: $\alpha = 4,4, p = 2,5, \varepsilon_\alpha = 2,3 \%$.

Для арматуры в предлагаемой модели принята согласующаяся с опытными данными предпосылка, что при нагреве под нагрузкой снижения упругих характеристик стали не происходит, а влияние температуры учитывается уменьшением предела текучести и упругости. Все это описывается следующими зависимостями:

$$\gamma_{s,tj} = \exp \left[-\omega_u \cdot \left(\frac{t_{s,j} - 20}{1000} \right)^c \right],$$

$$\gamma_{se,tj} = \exp \left[-\omega_e \cdot \left(\frac{t_{s,j} - 20}{1000} \right)^d \right], \quad (6)$$

где $t_{s,j}$ – температура нагрева арматуры, °C; ω_u, c, ω_e, d – опытные параметры для данного класса арматурной стали: $\omega_u = 13,25, c = 5, \omega_e = 12,42, d = 3$.

Уравнение связи напряжений и деформаций арматуры:

$$\sigma_{s,j} = \varepsilon_{s,j} \cdot E_s \cdot v_{s,j}, \quad (7)$$

где $v_{s,j}$ – коэффициент секущего модуля арматуры при работе в упругой стадии $v_{s,j} = 1$. После достижения предела упругости ($\varepsilon_{se,tj} \leq \varepsilon_{sj} \leq \varepsilon_{su}$) начинается развитие нелинейных деформаций, описываемое через локальный коэффициент секущего модуля $v_{\Delta s,j}$ по аналогии с бетоном:

$$v_{\Delta s,j} = \exp \left[-k_{\Delta s,tj} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{s,j} - \varepsilon_{se,tj}}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{se,tj}} \right)^{1/k_{\Delta s,tj}} \right];$$

$$v_{s,j} = \frac{\varepsilon_{se,tj}}{\varepsilon_{s,j}} \cdot (1 - v_{\Delta s,j}) + v_{\Delta s,j}; \quad (8)$$

$$k_{\Delta s,tj} = -\ln(v_{\Delta s,tj});$$

$$v_{\Delta s,tj} = \frac{R_{s,tj} - R_{se,tj}}{E_s \cdot (\varepsilon_{su} - \varepsilon_{se,tj})}, \quad (9)$$

где $R_{s,tj}$ – предел текучести арматуры, $R_{s,tj} = R_s \cdot \gamma_{s,tj}$; $R_{se,tj}$ – предел упругости арматуры, $R_{se,tj} = R_{se} \cdot \gamma_{se,tj}$; $\varepsilon_{se,tj}$ – деформации, соответствующие пределу упругости, $\varepsilon_{se,tj} = R_{se,tj} / E_s$; ε_{su} – деформации, соответствующие пределу текучести, $\varepsilon_{su} = 1,25 \%$.

После достижения предела текучести арматура работает на горизонтальном участке до разрыва, $v_{s,j} = R_{s,tj} / E_s \varepsilon_{s,j}$.

Температурные деформации арматуры определяются через коэффициент температурного расширения $\alpha_{s,t} = 15 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$:

$$\varepsilon_{s,tj}^{(t)} = \alpha_{s,t} \cdot (t_{s,j} - 20). \quad (10)$$

Плита подвергается одностороннему нестационарному нагреву по стандартному температурному режиму. По сечению конструкции развивается одномерное тепловое поле, значение температуры которого в заданной точке определяется методом нормализованной кривой [10]:

$$T_x = n_x \cdot n_w \cdot (T_f - 20) + 20, \quad ^\circ\text{C}, \quad (11)$$

где T_f – температура нагревающей среды при пожаре; n_x – безразмерный температурный параметр для точки, расположенной на расстоянии x от обогреваемой поверхности; для точек, находящихся в пределах нагреваемой толщи ($x/x_n \leq 1$):

$$n_x = \exp[-k_1 \cdot (x/x_n)^m] \cdot (1 - k_2) + k_2 \cdot [1 - (x/x_n)],$$

при $x/x_n > 1 \quad n_x = 0;$ (12)

$$x_n = \varphi \cdot \sqrt{\tau}, \quad (13)$$

x_n – глубина прогрева, мм; τ – время нагрева по стандартному температурному режиму, мин; n_w – безразмерный температурный параметр для обогреваемой поверхности;

$$n_w = 1 - \exp[-a_1 \cdot (\tau/60)^b], \quad (14)$$

$k_1, k_2, m, \varphi, a_1, b$ – опытные параметры для рассматриваемого вида бетона, получаемые из условия наилучшей сходимости расчётных и заданных температурных профилей (рис. 1): $k_1 = 8, k_2 = 0,03, m = 1,1, \varphi = 29 \text{ мм/мин}^{0,5}, a_1 = 2,7; b = 0,4$.

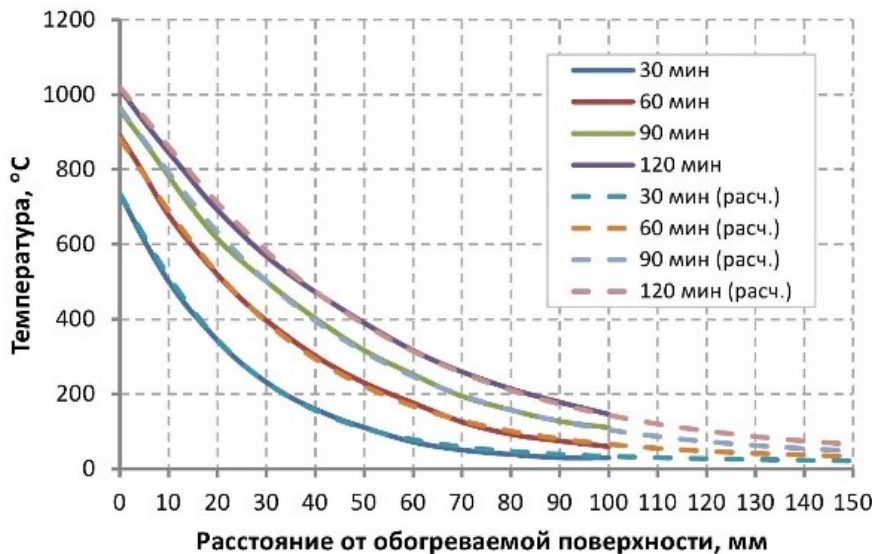


Рис. 1. Сравнение рассчитанных температурных профилей сечения с исходными из работы [8]

Таким образом, для полного нелинейного описания изменения свойств бетона и арматуры при нагреве, а также температурных профилей

по сечению в предлагаемой методике используется 18 опытных параметров.

Расчёт железобетонных элементов по деформационной модели нормальных сечений заключается в совместном решении трёх групп уравнений – статических (уравнения равновесия), геометрических (гипотеза плоских сечений) и физических (уравнения механического, а в данном случае – термомеханического состояния бетона и арматуры).

Как и при нормальных температурных условиях, для расчёта сечение по вертикали делится на элементарные участки бетона (i) и арматуры (j), площадь которых и координата от нулевой линии составляют A_{bi}, A_{sj} и y_{bi}, y_{sj} . Состояние сечения последовательно рассматривается в выбранные моменты времени нагрева по стандартному температурному режиму.

Разрешающая система уравнений в случае действия изгибающих моментов и продольных сил, учитывающая температурные деформации, записывается в следующем виде:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_t \\ (1/r)_t \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} B_{1t} \\ B_{2t} \end{Bmatrix}, \quad (15)$$

где N, M – заданные внешние силовые факторы; $D_{11}, D_{12} = D_{21}, D_{22}$ – компоненты матрицы жёсткости, определяемые так же, как и при нормальной температуре; ε_t и $(1/r)_t$ – продольное перемещение плоского сечения на уровне нулевой линии и его угол поворота (кривизна изогнутой оси элемента), являющиеся основными неизвестными расчёта; B_{1t}, B_{2t} – компоненты вектора температурных усилий:

$$\begin{aligned} B_{1t} &= \sum_i E_{b,i} v_{b,i} A_{b,i} \varepsilon_{b,i}^{(t)} + \sum_j E_s v_{s,j} A_{s,j} \varepsilon_{s,j}^{(t)}; \\ B_{2t} &= \sum_i E_{b,i} v_{b,i} A_{b,i} y_{b,i} \varepsilon_{b,i}^{(t)} + \sum_j E_s v_{s,j} A_{s,j} y_{s,j} \varepsilon_{s,j}^{(t)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Из решения системы уравнений методом переменных параметров упругости на n -м шаге итерационного процесса определяются основные неизвестные расчёта:

$$\begin{aligned} \varepsilon_t^{(n)} &= \frac{D_{22}(N + B_{1t}) - D_{12}(M + B_{2t})}{D_{11}D_{22} - (D_{12})^2}; \\ (1/r)_t^{(n)} &= \frac{M + B_{2t} - \varepsilon_t^{(n)} D_{12}}{D_{22}}. \end{aligned} \quad (17)$$

В качестве начального приближения используются значения неизвестных, полученных на предыдущем шаге нагружения или нагрева. Итерационный процесс продолжается до выполнения условия сходимости, когда результаты расчёта на двух соседних итерациях n и $(n - 1)$ перестанут отличаться более чем на 0,1 %. Обычно для получения решения требуется не более 10–15 итераций.

После наступления текучести в арматуре итерационный процесс не будет сходиться и дальнейший расчёт продолжается методом непосредственного подбора. Его смысл состоит в том, что для заданного значения кривизны $(1/r)$ подбирается соответствующее ему значение продольного смещения ε_t , при котором будет выполняться условие равновесия внешних и внутренних сил по N . Затем из второго условия равновесия определяется фактическое значение момента M .

Результатом расчёта изгибаемого элемента являются диаграммы «момент – кривизна» в выбранные моменты времени нагрева (рис. 2). Метод переменных параметров упругости работает только на восходящей ветви, метод непосредственного подбора позволяет получить горизонтальную или нисходящую ветвь на диаграмме.

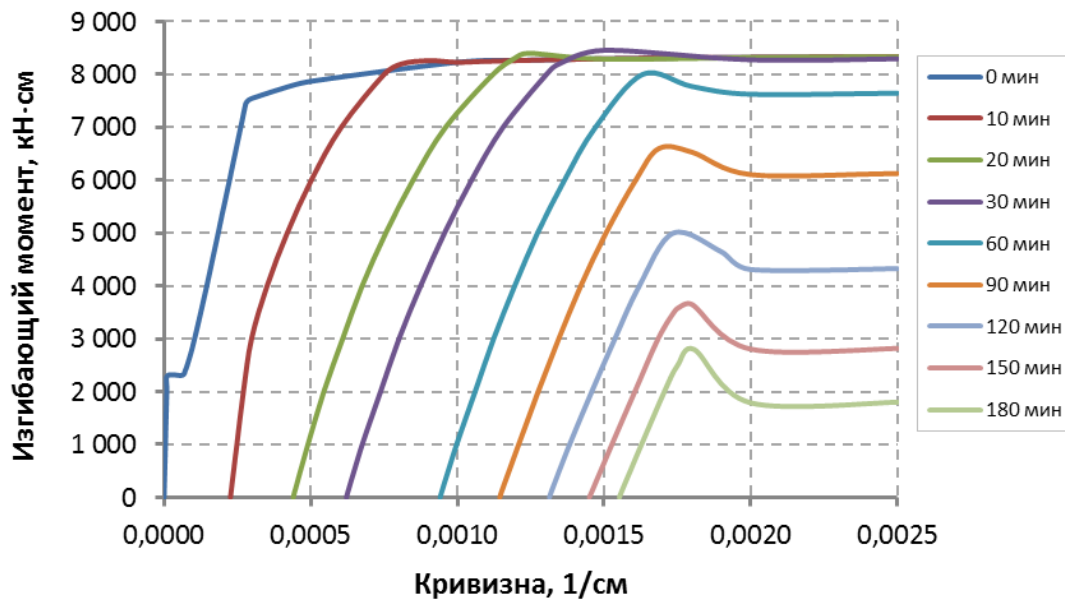


Рис. 2. Диаграммы «момент – кривизна» в выбранные моменты времени нагрева

В данной методике предполагается, что сцепление бетона и арматуры по длине элемента отсутствует и сохраняется только на его торцах. В этом случае действует гипотеза плоских сечений. В результате на диаграмме «момент – кривизна» появляется характерный скачок при образовании трещин. Данный эффект характерен только для условий нормальной температуры, а при нагреве сечение работает с трещиной во всём диапазоне изменения момента и скачок кривизны на диаграммах отсутствует.

Действие самоуравновешенных температурных напряжений по сечению привело к некоторому повышению несущей способности по сравнению с нормальными температурными условиями.

По рассчитанным значениям кривизны $(1/r)_t$ определяется прогиб балочной плиты:

$$f = 0,08 \cdot (1/r)_t \cdot l_0^2, \quad (18)$$

где 0,08 – коэффициент, учитывающий схему загрузки (действие сосредоточенных сил в четвертях пролёта); l_0 – расчётный пролёт плиты (4,5 м); $(1/r)_t$ – полная кривизна при действии изгибающего момента от внешней нагрузки и собственного веса плиты (33,36 кН·м).

Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными [8] показывает их удовлетворительную сходимость (рис. 3). Испытания были прекращены после достижения прогибом предельной величины 1/20 пролёта, однако плита продолжала сохранять несущую способность.

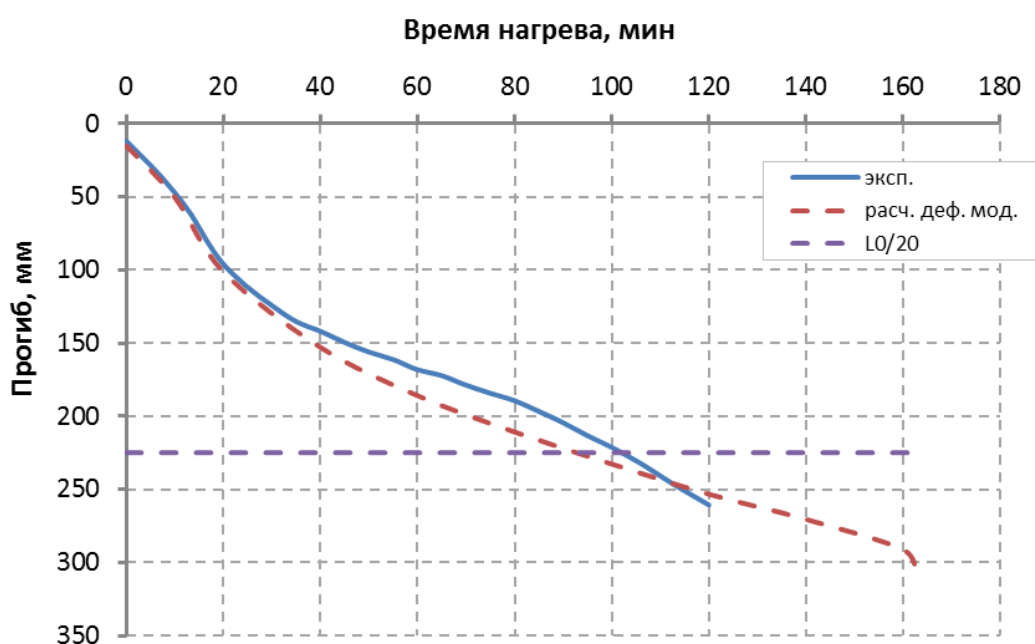


Рис. 3. Развитие прогиба железобетонной плиты при нагреве

Из-за неравномерного нагрева в элементе возникает тепловой изгиб, поэтому имеется некоторое значение свободной температурной кривизны $(1/r)_{tem}$ при нулевом моменте. Изгибная жёсткость элемента D_t , как известно из сопротивления материалов, определяется отношением изгибающего момента к силовой кривизне:

$$D_t = \frac{M}{(1/r)_t - (1/r)_{tem}}. \quad (19)$$

Геометрически изгибная жёсткость элемента равна тангенсу угла наклона секущей к диаграмме «момент – кривизна», проведённой из точки, соответствующей нулевому моменту, в точку с заданным значением M . Следует заметить, что значение D_t не равно компоненту D_{22} из матрицы жёсткости.

Сравнение графиков изменения силовой кривизны с увеличением M для различных моментов времени нагрева показывает, что температурная деградация механических свойств бетона и арматуры существенно влияет на снижение жёсткости лишь в первые моменты времени нагрева, а также после наступления текучести в растянутой арматуре (рис. 4).

Полученные по предлагаемой методике значения могут быть использованы для корректировки жёсткостных характеристик сечений в линейном конечно-элементном программном комплексе, что наряду с учётом температурных деформаций позволит достаточно просто решать задачи нелинейного расчёта статически неопределимых конструкций в условиях резкорегимного нестационарного теплового воздействия.

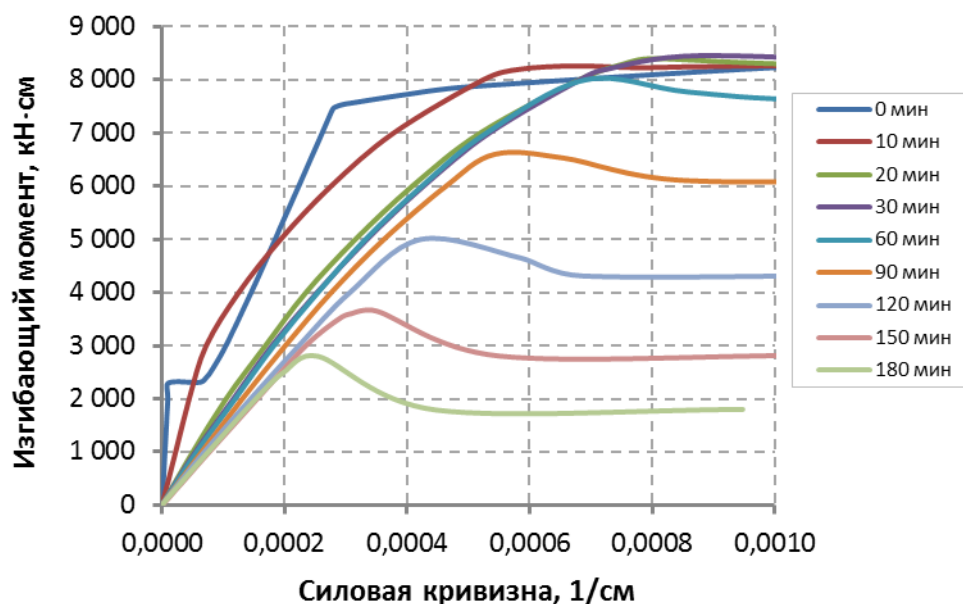


Рис. 4. Диаграммы «момент – силовая кривизна» в выбранные моменты времени нагрева

Выводы

Обобщённой характеристикой состояния изгибаемого железобетонного элемента при действии внешних силовых факторов и неравномерного резкорезимного нагрева, изменения его прочности и жёсткостных характеристик являются диаграммы «момент – кривизна», построенные для выбранных моментов времени нагрева.

В результате проведённых численных исследований выявлено, что развитие кривизны изгибаемого элемента в процессе нестационарного резкорезимного теплового воздействия происходит в основном за счёт собственной температурной кривизны, возникающей из-за неравномерного нагрева сечения. Влияние же температурной деградации деформативных свойств бетона и арматуры существенно ниже.

Список литературы

1. Ключева Н. В. К влиянию ограниченных температурных деформаций железобетонных изгибаемых элементов на живучесть зданий и сооружений / Н. В. Ключева, А. Г. Тамразян // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 12. – С. 49–51.
2. Аветисян Л. А. Использование шарниров пластичности при расчете зданий на прогрессирующее обрушение в условиях огневых воздействий / Л. А. Аветисян // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 2. – С. 34–40.
3. Ширко А. В. Прочностной расчет железобетонных плит при пожаре с использованием программной среды ANSYS / А. В. Ширко, А. Н. Камлюк, И. И. Полевода, Н. В. Зайнудинова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – № 1 (19), – С. 48–58.
4. Мкртычев О. В. Расчет железобетонного здания на температурное воздействие / О. В. Мкртычев, Д. С. Сидоров // Вестник МГСУ. – 2012. – № 5. – С. 50–55.
5. Kodur V. K. R. A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams / V. K. R. Kodur, M. B. Dwaikat // Cement and Concrete Composites. – 2007. – № 8 (4). – P. 1–13.
6. El-Fitiany S. F. Assessing the Flexural and Axial Behaviour of Reinforced Concrete Members at Elevated Temperatures Using Sectional Analysis / S. F. El-Fitiany, M. A. Youssef // Fire Safety Journal. – 2009. – № 5 (44). – P. 691–703.
7. Lu L. M. A simplified multi-iteration method for restrained beams under fire / L. M. Lu, Y. Yuan, E. Annerel, L. Taerwe // Material and Structures. – 2015. – № 48 (1). – P. 9–19.
8. Minne R. Weerstand tegen brand van vloerplaten in gewapend beton – Fire Resistance of Reinforced Concrete Slabs / R. Minne, M. Vandamme. – Ghent University : Laboratory for Fuel Technology and Heat Transfer, 1979.
9. Федоров В. С. Нелинейное деформирование бетона в условиях режимного нагружения при кратковременном нестационарном нагреве / В. С. Федоров, В. Е. Левитский // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2019. – № 4 (30). – С. 89–93.
10. Федоров В. С. Методика построения температурных профилей для расчёта огнестойкости железобетонных конструкций методом нормализованной кривой / В. С. Федоров, В. Е. Левитский, В. Е. Матвиенко // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 1 (35). – С. 5–8.

© В. С. Федоров, В. Е. Левитский, Е. А. Исаева

Ссылка для цитирования:

Федоров В. С., Левитский В. Е., Исаева Е. А. Термическая деградация жёсткостных характеристик изгибаемых железобетонных элементов при нестационарном одностороннем нагреве со стороны растянутой зоны // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 1 (39). С. 10–15.