

УДК 614.841.332(083.7)

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОФИЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЁТА ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ НОРМАЛИЗОВАННОЙ КРИВОЙ

В. С. Федоров, В. Е. Левитский, В. Е. Матвиенко

«Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ), г. Москва, Россия

В статье описана методика построения цифровых моделей одномерных и двумерных температурных полей по сечению стержневых железобетонных конструкций на основе имеющихся экспериментальных и справочных данных. Приведённые формулы и значения коэффициентов позволяют в сжатом виде представить температурные профили, необходимые для расчёта огнестойкости с учетом деформационной модели нормальных сечений. Для создания цифровой модели теплового поля необходимо, чтобы температура не только на поверхности, но и в любой точке сечения максимально близко соответствовала имеющимся сведениям при наименьшем количестве опытных параметров. Все это достигается выбором формы задания кривой и методики нормализации. Данная работа посвящена выработке подходов и алгоритмов для решения поставленной задачи.

Ключевые слова: стандартный температурный режим пожара, температура поверхности конструкции, температура в точке сечения, глубина прогрева, односторонний нагрев, нагрев с четырёх сторон.

The article presents a method for constructing digital models of one-dimensional and two-dimensional temperature fields across the cross-section of reinforced concrete rod structures based on available experimental and reference data. The given formulas and the values of the coefficients allow us to present in a compressed form the temperature profiles necessary for the calculations of fire resistance based on the deformation model of normal sections. To create a digital model of the thermal field, it is necessary that the temperature not only on the surface, but also at any point of the cross-section, corresponds as closely as possible to the available data with the least number of experimental parameters. It is achieved by choosing the appropriate form for setting the curve and the normalization method. This work is devoted to the development of approaches and algorithms for solving this problem.

Keywords: standard temperature regime of a fire, surface temperature of a structure, temperature at a cross-sectional point, heating depth, one-sided heating, heating from four sides.

Для расчёта огнестойкости железобетонных конструкций необходимо наличие данных о тепловом поле по сечению. Существует большое количество программных комплексов для решения теплотехнической задачи при определенных граничных условиях и теплофизических параметрах материала, но часто возникают ситуации, когда на основе экспериментов получены показатели температуры прогрева в отдельных точках сечения и надо представить их в виде цифровой модели, наиболее приближенной к опытным результатам [1, 2, 4–7]. При использовании в расчёте уже имеющегося температурного профиля, приведённого в справочной литературе (например, большое количество профилей содержится в Приложениях к СП 468.1325800.2019 или EN 1992-1-2), также требуется цифровая модель. Она позволяет на основе имеющихся данных находить температуру для определенного момента времени нагрева в любой точке сечения с заданными координатами.

Отечественные и зарубежные исследователи неоднократно пытались разработать методику, позволяющую на основе трансформации в относительных координатах некоторой выбранной кривой (будем называть её *нормализованной кривой*) получать температурные профили по сечению для разных моментов времени нагрева. В рекомендациях исследователей Всероссийского ордена «Знак Почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны (ВНИИПО – А.И. Яковлев и др., [1]) в качестве такой кривой предлагалось использовать интеграл ошибок Гаусса. Однако это оказалось не

удобным, поскольку данный интеграл не выражается через элементарные функции. Учёные Научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института бетона и железобетона им. А. А. Гвоздева (НИИЖБ – В.В. Жуков, А.Е. Сегалов и др., [2]) – выбрали параболу, что позволило упростить расчёт, но привело к некоторому снижению точности.

Особенность перечисленных методов – они создавались как упрощённые варианты ручного расчёта, ориентированные на решение теплотехнической задачи «с нуля», исходя из принятых предположений о граничных условиях и теплофизических характеристиках материала. Принятое в расчёте понятие «фиктивного прогретого слоя» не позволяет контролировать температуру на поверхности конструкции, являющуюся важным параметром оценки адекватности заданных граничных условий.

В работе Викстрема (U. Wickstrom [3]) в качестве кривой выступает логарифмическая функция, которая не всегда соответствует действительному распределению температуры. Предложенная V.K.R. Kodur и другими исследователями [4] эмпирическая формула связана с большим количеством коэффициентов. Она не даёт возможности сверять температуру поверхности и глубину прогрева бетона с исходной.

Вместе с тем для создания цифровой модели теплового поля необходимо, чтобы температура не только на поверхности, но и в любой точке сечения максимально близко соответствовала имеющимся данным при наименьшем количестве

опытных параметров, что достигается соответствующим выбором формы задания нормализованной кривой и методики нормализации.

В качестве исходных данных приняты температурные профили из Приложения к СП 468.1325800.2019. На рисунке 1 показаны профили одномерного температурного поля в железобетонной плите толщиной 200 мм при нестационарном одностороннем нагреве со стороны нижней поверхности по стандартному температурному режиму. Те же профили для разных моментов времени нагрева, построенные в относительных координатах n_x и (x/x_n) , как это видно из рисунка 2, с достаточной степенью точности укладываются на одну кривую,

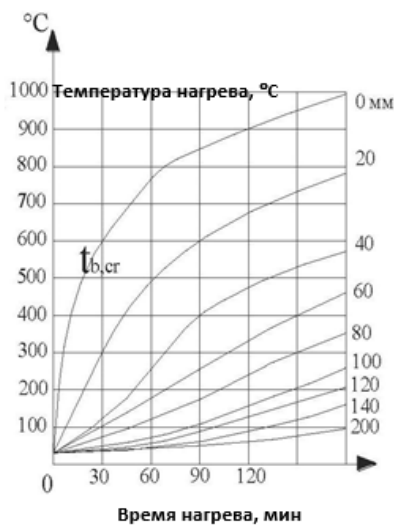


Рис. 1. Исходные температурные профили в плите толщиной 200 мм (рис. А.2 СП 468.1325800.2019)

Для нормализованной кривой предлагается использовать выражение следующего вида:

$$n_x = \exp[-k_1 \cdot (x/x_n)^m] \cdot (1 - k_2) + k_2 \cdot [1 - (x/x_n)] \quad (2)$$

при $x/x_n \leq 1$,

где k_1, k_2, m – безразмерные опытные параметры. При $x/x_n > 1$ $n_x = 0$.

Глубина прогрева x_n , мм, определяется из условия наилучшей сходимости температурных профилей для разных моментов времени нагрева с нормализованной кривой и может быть задана выражением:

$$x_n = \varphi \cdot \sqrt{\tau} \quad (3)$$

где φ – опытный параметр, мм/мин^{0,5}; τ – время нагрева по стандартному температурному режиму, мин.

При известных значениях n_x и T_w температура в заданной точке при одномерном тепловом поле определяется по формуле (1):

$$T_x = n_x \cdot (T_w - 20) + 20, \text{ °C.} \quad (4)$$

являющуюся исходным вариантом нормализованной кривой. Здесь безразмерный параметр n_x выражает относительную температуру:

$$n_x = \frac{T_x - 20}{T_w - 20} \quad (1)$$

где T_x – температура нагрева в данный момент времени в точке сечения с координатой x , отсчитываемой от обогреваемой поверхности; T_w – температура обогреваемой поверхности; x_n – глубина прогрева сечения (при $x \geq x_n$ температура равна начальной, то есть 20 °C).

Таким образом, нормализованная кривая выражает значения относительной температуры n_x в функции от относительной координаты x/x_n .

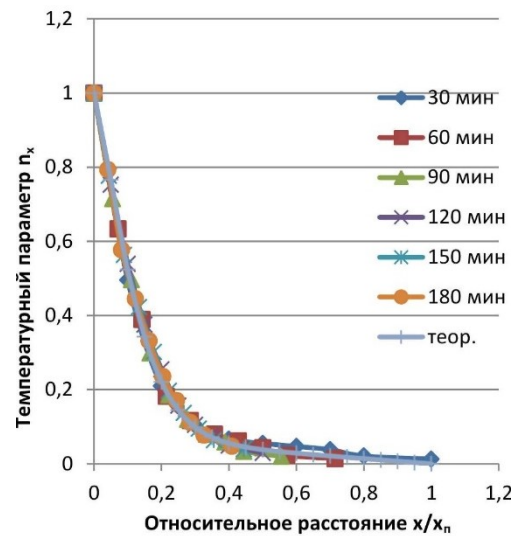


Рис. 2. Нормализованная кривая, полученная совмещением температурных профилей для разных моментов времени нагрева

Если предположить, что температура поверхности конструкции T_w связана с температурой среды T_f при нагреве по стандартному режиму безразмерным параметром n_{ew}

$$n_w = \frac{T_w - 20}{T_f - 20} \quad (5)$$

то выражение для температуры в точке с координатой x приобретает вид:

$$T_x = n_x \cdot n_w \cdot (T_f - 20) + 20, \text{ °C.} \quad (6)$$

Зависимость безразмерного параметра n_w от времени нагрева предлагается принять в виде:

$$n_w = 1 - \exp[-a_1 \cdot (\tau/60)^b] \quad (7)$$

где a_1, b – безразмерные опытные параметры.

Таким образом, для построения цифровой модели теплового поля требуется задать шесть опытных параметров: $k_1, k_2, m, \varphi, a_1, b$, которые зависят от теплофизических характеристик бетона, тепловой инерции сечения и граничных условий на необогреваемой поверхности.

В случае обогрева с двух перпендикулярных сторон, то есть двумерного теплового поля, температура в вершине угла принимается равной температуре среды T_f и используется принцип суперпозиции (наложения) тепловых полей. При данных предпосылках температура в точке сечения с координатами x и y определяется решением Викстрема [3]:

$$T_{xy} = [n_w \cdot (n_x + n_y - 2 \cdot n_x \cdot n_y) + n_x \cdot n_y] \cdot (T_f - 20) + 20, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (8)$$

где n_x и n_y – безразмерные температуры, определённые по формуле (2) для расстояний x и y от перпендикулярных обогреваемых поверхностей.

Если нагрев происходит с нескольких сторон, в качестве параметров n_x и n_y принимаются их суммы для каждой из взаимно параллельных поверхностей. Например, при нагреве с четырёх сторон:

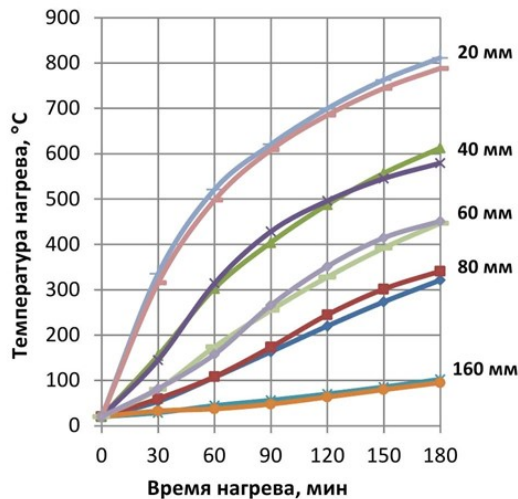


Рис. 3. Сравнение теоретических и опытных значений температур по сечению плиты толщиной 200 мм

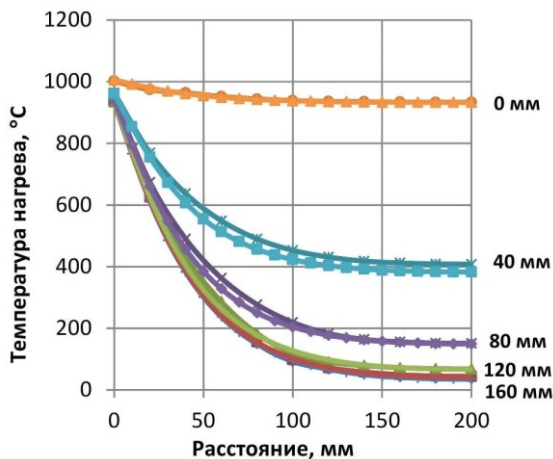


Рис. 5. Сравнение теоретических и опытных значений температур по сечению колонны в момент времени нагрева 90 мин.

Как видно из приведённых на рисунках 3 и 5 примеров, рассчитанные значения температур соответствуют исходным.

$$n_x = n_{x1} + n_{x2}, \quad n_y = n_{y1} + n_{y2}. \quad (9)$$

На основе данной методики построены температурные профили в указанной ранее плите толщиной 200 мм при одностороннем нагреве (рис. 3) и в колонне сечением 400 × 400 мм при нагреве с четырёх сторон (рис. 4–6). Принятые значения опытных параметров приведены в таблице.

Таблица

Значения опытных параметров для построения температурных профилей

Конструкция	k_1	k_2	m	φ , мм/мин ^{0,5}	a_1	b
Плита	14	0,07	1,3	37	1,5	0,4
Колонна	7	0	1,1	26	2,1	0,48

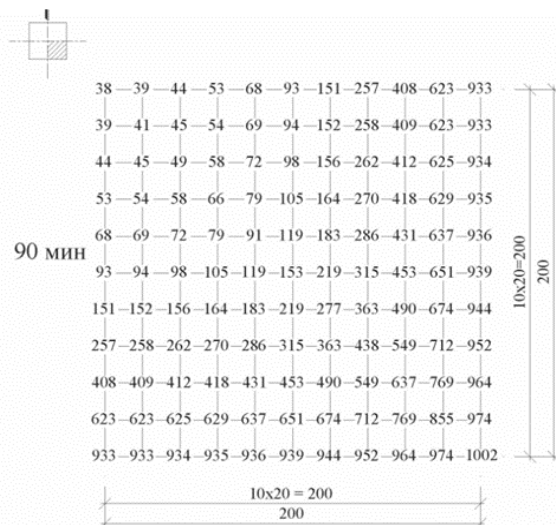


Рис. 4. Исходные температурные профили в колонне сечением 400 × 400 мм после 90 мин. нагрева (рис. Б.5 СП 468.1325800.2019)

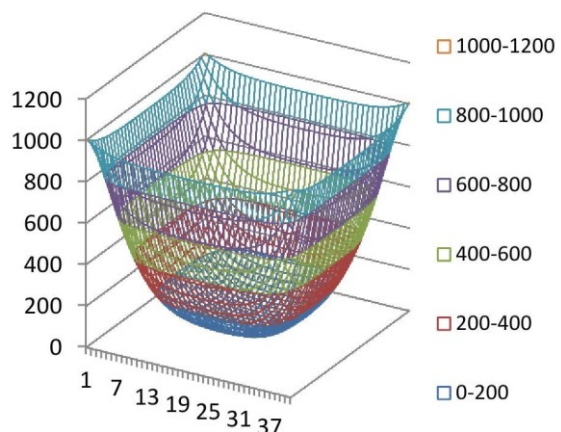


Рис. 6. Визуализация цифровой модели теплового поля в сечении колонны после 90 мин. нагрева с четырёх сторон

Предложенная методика создания цифровой модели теплового поля на основе нормализован-

ной кривой позволяет с помощью экспериментальных и справочных данных о температурах в нескольких точках быстро получить компактный вид полного набора температурных профилей се-

чения в разные моменты времени нагрева, пригодных для непосредственного использования в расчёте огнестойкости железобетонных конструкций по деформационной модели.

Список литературы

1. Яковлев А. И. Основные принципы расчёта пределов огнестойкости строительных конструкций / А. И. Яковлев // Огнестойкость строительных конструкций. – 1980. – Вып. 8. – С. 3–14.
2. Сегалов А. Е. О расчёте фактических пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций / А. Е. Сегалов // Огнестойкость железобетонных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1984. – С. 61–68.
3. Wickstrom U. A Very Simple Method for Estimating Temperatures in Fire Exposed / U. Wickstrom // Concrete Structures. – Elsevier Applied Science Publishers, 1986. – P. 186–194.
4. Kodur V. K. R. A Simplified Approach for Predicting Temperature in Reinforced Concrete Members Exposed to Standard Fire / V. K. R. Kodur, B. L. Yu, M. M. S. Dwaikat // Fire Safety Journal. – 2013. – Vol. 56. – P. 39–51.
5. Купчикова Н. В. Технология реконструкции, санации и капитального ремонта зданий, включая экспертизу геоподосновы, оснований и фундаментов / Н. В. Купчикова. – Астрахань: АГАСУ, 2019.
6. Fedorov V. S., Kupchikova N. V. Numerical researches of the work of the pile with end spherical broadening as part of the pile group / V. S. Fedorov, N. V. Kupchikova // Материалы XIII Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов / под общ. ред. В. А. Гутмана, Т. В. Золиной. – 2019. – С. 149–153.
7. Kupchikova N. V. Numerical researches of the work of the pile with end spherical broadening as part of the pile group / N. V. Kupchikova // Building and Reconstruction. – 2019. – № 6 (86). – С. 3–9.
8. Купчикова Н. В. Экспериментальные исследования с ложными ограничениями при разработке способа возведения инъекционных свай / Н. В. Купчикова, Р. И. Шаяхмедов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. – № 3 (33). – С. 58–62.
9. Купчикова Н. В. Экспертиза геоподосновы, оснований и фундаментов глубокого заложения: региональные особенности учёта и оценки деформаций при эксплуатации / Н. В. Купчикова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. – № 3 (33). – С. 63–68.
10. Купчикова Н. В. Технология реконструкции, санации и капитального ремонта зданий, включая экспертизу геоподосновы, оснований и фундаментов / Н. В. Купчикова. – Астрахань, 2019.
11. Zolina T. Influence of vibration impacts from vehicles on the state of the foundation structure of a residential building / T. Zolina, N. Kupchikova // E3S Web of Conferences. Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019. – 2019. – P. 03053.

© В. С. Федоров, В. Е. Левитский, В. Е. Матвиенко

Ссылка для цитирования:

Федоров В. С., Левитский В. Е., Матвиенко В. Е. Методика построения температурных профилей для расчёта огнестойкости железобетонных конструкций методом нормализованной кривой // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2021. № 1 (35). С. 5–8.

УДК 624.078.465

ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ (АБСОЛЮТНОЕ) УДЛИНЕНИЕ РАСТЯНУТОГО БОЛТА

Н. Л. Тишков, А. Н. Степаненко, А. В. Белов, А. А. Иодчик

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

В статье предложен прием определения величины действительного удлинения растянутого болта для измерения его предварительного напряжения во фланцевых соединениях. Для обеспечения неизменяемости стыковых фланцевых соединений (не превращения их в механизм) при эксплуатации в болтах стыка создается начальное растягивающее усилие. Величина этого усилия должна быть близкой к оптимальной, позволяющей сохранить неизменяемость соединения при нагружении до достижения в нем расчетного усилия в стыкуемом элементе. Чтобы определить оптимальную величину усилия предварительного напряжения высокопрочного болта, необходимо знать действительную величину абсолютного удлинения рабочей части «стержня». В работе представлено численное моделирование болтового соединения для определения его действительного удлинения с учетом: ослабления сечения резьбой рабочей части «стержня», податливости резьбового соединения, зазоров между болтом и стенкой фланцев, деформаций гайки и головки болта. По результатам численного эксперимента предложена регрессия, которая может быть рекомендована для практических расчетов.

Ключевые слова: фланцевое соединение, болты, предварительное напряжение, оптимальное усилие, удлинение болтового соединения.

A VALID (ABSOLUTE) LENGTHENING STRETCHED BOLT

N. L. Tishkov, A. N. Stepanenko, A. V. Belov, A. A. Iodchik

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

The article proposes a method for determining the value of the actual elongation of a stretched bolt to determine the magnitude of the prestressing of bolts in flange joints. To ensure the invariability of butt flange joints (not turning them into a mechanism) during operation, an initial tensile force is created in the joint bolts. The magnitude of this force should be close to the optimal one, allowing the joint to remain unchanged under loading until it reaches the design force in the abutting element. To determine the optimal value of the prestressing force of a high-strength bolt, it is necessary to know the actual value of the absolute elongation of the working part of the “rod” of the prestressing bolt. The paper presents a numerical modeling of a bolted connection to determine the actual elongation