

УДК 691.328.1:519.657

МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ОЦЕНКИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ПРИ ЗИМНЕМ БЕТОНИРОВАНИИ**Федоров В.И., Местников А.Е.***ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», Якутск,
e-mail: valeriyif.ykt@gmail.com*

В статье рассматривается получение мультипараметрического уравнения оценки относительной прочности бетона при различных режимах термической обработки. В статье особое внимание обращается на климатические условия Республики Саха (Якутия) и термонапряженное состояние бетона, твердеющего в условиях отрицательной температуры внешней среды. Основу статьи составляет компьютерная интерполяция номограмм ТСН 12-336-2007 «Производство бетонных работ при отрицательных температурах среды на территории Республики Саха (Якутия)». Выявлена и обоснована необходимость совершенствования существующей методики расчета относительной прочности бетона. Уравнение регрессии получено методом наименьших квадратов с использованием стандартных методов статистического и компьютерного анализа. Результаты статистической обработки дают максимальное представление о свойствах мультипараметрического уравнения, возможных сочетаниях линейных и квадратичных взаимосвязей факторов, что обеспечивает достоверный и точный прогноз с минимальной погрешностью. Использование мультипараметрического уравнения построена номограмма, показывающая взаимосвязь относительной прочности бетона со средней температурой и продолжительностью термической обработки. Рассмотрены преимущества и недостатки расчета относительной прочности бетона по предлагаемой методике. Обоснована возможность использования мультипараметрического уравнения в выборе оптимальных схем термической обработки бетона в условиях Сибири и Крайнего Севера.

Ключевые слова: зимнее бетонирование, термическая обработка, относительная прочность, номограмма, интерполяция, уравнение регрессии

MULTI-PARAMETER EQUATION OF ESTIMATION OF RELATIVE STRENGTH OF CONCRETE IN WINTER CONCRETING**Fedorov V.I., Mestnikov A.E.***Federal Autonomous Educational Institution of Higher Education North-Eastern Federal University
named after Ammosov, Yakutsk, e-mail: valeriyif.ykt@gmail.com*

The article discusses the derivation of a multiparameter equation for estimating the relative strength of concrete under various heat treatment conditions. The article pays special attention to the climatic conditions of the Sakha Republic (Yakutia) and the thermal stress state of concrete hardening in conditions of negative environmental temperature. The article is based on computer interpolation of nomograms of TSN 12-336-2007 «Production of concrete works at negative environmental temperatures in the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)». Identified and justified the need to improve the existing method of calculating the relative strength of concrete. The regression equations are obtained by the least squares method using standard statistical and computer analysis methods. The results of statistical processing give the maximum idea of the properties of a multiparameter equation, possible combinations of linear and quadratic relationships of factors, which provides a reliable and accurate prediction with a minimum error. Using a multiparameter equation, a nomogram was constructed showing the relationship between the relative strength of concrete and the average temperature and duration of heat treatment. The advantages and disadvantages of calculating the relative strength of concrete by the proposed method are considered. The possibility of using a multiparameter equation in the choice of the optimal schemes for the heat treatment of concrete in the conditions of Siberia and the Far North is substantiated.

Keywords: winter concreting, heat treatment, relative strength, nomogram, interpolation, regression equation

В суровых климатических условиях Арктической зоны Российской Федерации и мира бетонные работы очень часто проводятся в зимнее время года [1]. В районах Сибири и Крайнего Севера в зимний строительный период выполняется порядка 50–75% годового объема таких работ [2]. Отечественными и зарубежными исследованиями установлено, что качество бетонных и железобетонных конструкций, изготовленных в зимний период, зависит от сочетания обширного количества внешних и внутренних факторов [3–5]. Среди них наиболее весомыми как по конечным результатам, так и по возможности регу-

лирования процессов являются параметры термического воздействия. Общеизвестно, что повышение температуры до 100 °С не оказывает негативного влияния на степень гидратации цемента [6]. При этом термическое воздействие меняет соотношение между порами и капиллярами различных размеров и в целом на формирование макро- и микроструктуры композита, что в последующем значительно ухудшает физико-механические свойства бетона [2, 7]. В связи с этим, учитывая климатические условия Республики Саха (Якутия), вопросы, связанные с проектированием режимов термического воздействия на бетонную

конструкцию, а также разработкой и совершенствованием методов прогноза относительной прочности бетона, приобретают особую актуальность.

В настоящее время в строительном комплексе Республики Саха (Якутия) при проектировании зимних железобетонных работ широко применяется номограмма нарастания прочности бетона по нормам ТСН 12-336-2007 [8], разработанным коллективом авторов Якутского института строительства (ЯкутПНИИС). Но мелкий масштаб, сложность восприятия номограмм (десять семейств графиков на одной масштабной линейке) и запутанная схема расчета не позволяют производителям бетонных работ обеспечить высокую достоверность их трактовки и интерпретации расчетных данных.

Целью настоящей исследовательской работы является компьютерная интерполяция номограммы набора относительной прочности бетона с использованием современных методов компьютерной обработки для получения мультипараметрического уравнения с высокой степенью корреляции с данными норм ТСН 12-336-2007.

Материалы и методы исследования

Относительная прочность бетона после термической обработки определяется по методике ТСН 12-336-2007. Компьютерная интерполяция номограммы ТСН 12-336-2007 проведена с помощью математического пакета MathCAD 2001i Professional. Уравнение регрессии получено с использованием метода наименьших квадратов. Оценка достоверности уравнения регрессии выполнена с использованием стандартных методов статистического анализа [9]. Для автоматизации расчета теоретической прочности бетона разработан простой в использовании калькуля-

тор на базе программы Microsoft Office EXCEL 2007 с учетом положений ТСН 12-336-2007.

Результаты исследования и их обсуждение

В технологических расчетах оценивают так называемую относительную прочность бетона, которая показывает процент набора проектного класса прочности в зависимости от режима (продолжительность и температура) термической обработки. По данным ТСН 12-336-2007 [8] и [10]. Величина относительной прочности бетона может быть описана функцией

$$R = f(\tau_n, \tau_{н.в.}, \tau_o, t_n, t_{н.в.}, t_o), \quad (1)$$

где R – относительная прочность бетона, %; $\tau_n, \tau_{н.в.}, \tau_o$ – продолжительность нагрева, изотермической выдержки и остывания, ч; $t_n, t_{н.в.}, t_o$ – средние температуры нагрева, изотермической выдержки и остывания, °С;

Количественная интерпретация уравнения (1) достигается построением уравнения регрессии в виде полинома второй степени:

$$R(t_n, \tau_n) = b_0 + b_1 \cdot t_n + b_2 \cdot \tau_n + b_3 \cdot \tau_n^2 + b_4 \cdot \tau_n^3, \quad (2)$$

где b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 – коэффициенты регрессии; t_n – средняя температура тепловой обработки (нагревание, изотермическая выдержка, остывание), °С;

τ_n – продолжительность тепловой обработки (нагревание, изотермическая выдержка, остывание), ч.

В первую очередь данные номограммы ТСН 12-336-2007 экспортированы в электронную таблицу, затем рассчитаны методом наименьших квадратов для получения уравнения регрессии. Фрагмент экспортированных данных приведен в табл. 1.

Таблица 1

Фрагмент числовых значений номограммы нарастания относительной прочности бетона по ТСН 12-336-2007 [8]

№ п/п	Продолжительность тепловой обработки τ_n , ч	Средняя температура тепловой обработки t_n , °С	Процент набора проектной прочности тяжелого бетона, %
1	10	-4	0
2	20	-4	2
3	30	-4	4
4	40	-4	5
5	50	-4	12
...
100	20	70	76
101	30	70	83
102	40	70	86
103	10	80	70
104	20	80	80

Таблица 2

Оценка адекватности уравнения регрессии

№ п/п	Наименование показателя	Обозначение	Значение
1	Сумма квадратов остатков	$\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$	4536,49
2	Остаточная дисперсия	$S_{\text{ост}}^2$	45,82
3	Коэффициент детерминации	R^2	0,97
4	Критерий Фишера	$F_p > F_{\text{табл}}$	44,04 > 1,24

Если предположить, что результаты рассчитанных данных соответствуют закону нормального распределения, то уравнение прогноза относительной прочности бетона (после оценки значимости коэффициентов регрессии) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} R(t_n, \tau_n) = -17,983 + 1,639 \cdot t_n + 0,928 \cdot \tau_n - 0,003 \cdot \tau_n^2 - 0,009 \cdot \tau_n^2 \\ t_n = \{t_n, t_{\text{н.в.}}, t_o\} \rightarrow [-4 \dots + 80^\circ\text{C}] \\ \tau_n = \{\tau_n, \tau_{\text{н.в.}}, \tau_o\} \rightarrow [10 \dots 170 \text{ ч}] \end{cases}$$

Оценка значимости коэффициентов уравнения (3) выполнена с использованием выражения

$$\begin{cases} |\hat{a}_i - \bar{a}_i| \leq S_i \cdot \varepsilon \\ S_i^2 = c_{ii} \cdot S_{\text{ост}}^2 \\ S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N - d} \end{cases}, \quad (4)$$

где \hat{a}_i – значение i -го коэффициента модели;
 \bar{a}_i – истинное значение i -го коэффициента модели;
 S_i^2 – оценка дисперсии;
 ε – граничное значение критической области χ^2 -распределения;
 c_{ii} – элементы главной диагонали дисперсионной матрицы;

В выражении (4) принималось во внимание, что в каждой ячейке расчетной таблицы (табл. 1) проводилось одно вычисление, в соответствии с этим ошибка наблюдений является неизвестной величиной. Поэтому доверительный интервал уравнения (3) при доверительной вероятности $P = 0,95$ найден на основании положений, изложенных в [9].

Оценка адекватности модели (3) в соответствии с рекомендациями [9] выполнена с использованием следующих статистических показателей: сумма квадратов остатков, остаточная дисперсия, коэффициент детерминации и критерий Фишера. Результаты статистических расчетов занесены в табл. 2.

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ расчетное значение критерия Фишера составляет $F_p = 44,04$, что значительно превышает

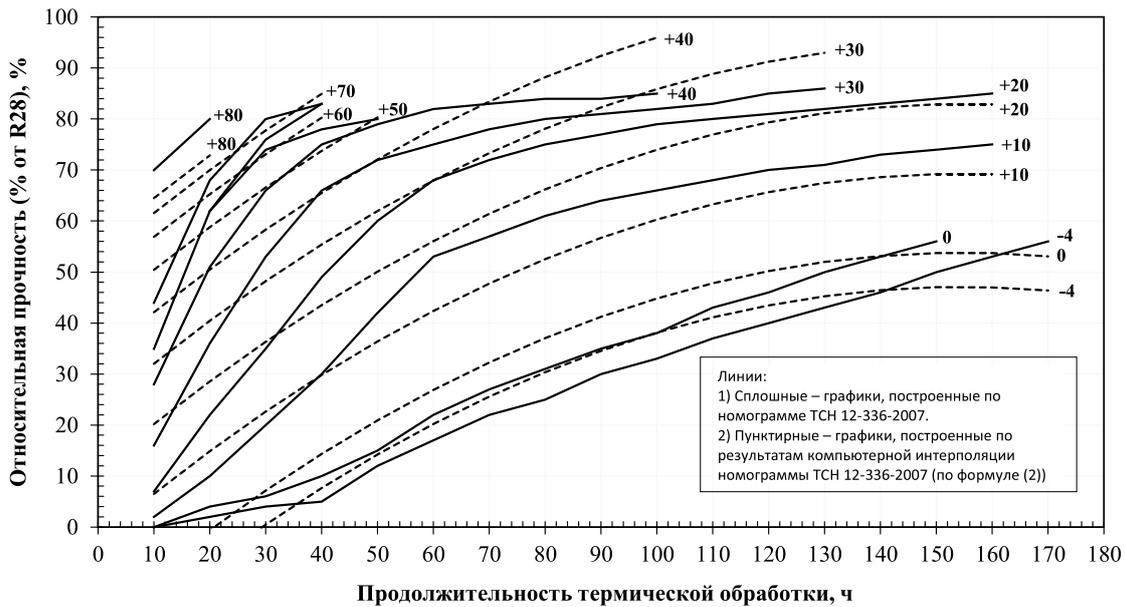
ее табличное значение $F_{\text{табл}} = 1,24$. То есть рассеяние относительно полученного уравнения регрессии (3) многократно меньше рассеяния относительно среднего. На основании изложенного, близкий к единице коэффициент детерминации, а также соответствие критерия Фишера подтверждает достоверность уравнения регрессии и его пригодность для получения мультипараметрического уравнения оценки относительной прочности бетона.

Графическая интерпретация уравнения (3) представлена в виде номограммы нарастания относительной прочности бетона при различных режимах термической обработки (рис. 1). Из графиков видно, что расположение и вектор направления кривых, полученных из уравнения (3), практически идентичны графикам ТСН 12-336-2007 за исключением незначительных расхождений (табл. 2).

По данным фактического температурного режима твердения бетона рассчитывают среднюю температуру в период нагрева, изотермической выдержки и остывания по следующим формулам [8, 10]:

$$\begin{cases} t_n = \frac{t_{\text{min}}^H + t_{\text{max}}^H}{2} \\ t_{\text{н.в.}} = \frac{t_{\text{min}}^{\text{н.в.}} + t_{\text{max}}^{\text{н.в.}}}{2}, \\ t_o = \frac{t_{\text{min}}^o + t_{\text{max}}^o}{2} \end{cases}, \quad (5)$$

где $t_n, t_{\text{н.в.}}, t_o$ – средние температуры нагрева, изотермической выдержки и остывания, $^\circ\text{C}$;



Номограмма нарастания относительной прочности бетона при различных режимах термической обработки

$t_{\min}^H, t_{\min}^{H.B.}, t_{\min}^O$ – минимальные температуры нагрева, изотермической выдержки и остывания, °С;
 $t_{\max}^H, t_{\max}^{H.B.}, t_{\max}^O$ – максимальные температуры нагрева, изотермической выдержки и остывания, °С.

С учетом специфики расчета относительной прочности бетона по номограммам ТСН 12-336-2007 уравнение (2) приобретает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_H(\tau_H, t_H) = -17,983 + 0,928 \cdot \tau_H - 0,003 \cdot \tau_H^2 + 1,639 \cdot t_H - 0,009 \cdot t_H^2 \\ R_{H.B.}(\tau_{H.B.}, \tau_{H.B.}, t_H, t_{H.B.}) = (-17,983 + 0,928 \cdot (\tau_H + \tau_{H.B.}) - 0,003 \cdot (\tau_H + \tau_{H.B.})^2 + \\ + 1,639 \cdot t_{H.B.} - 0,009 \cdot t_{H.B.}^2) - R_H \\ R_O(\tau_H, \tau_{H.B.}, \tau_O, t_H, t_{H.B.}, t_O) = (-17,983 + 0,928 \cdot (\tau_H + \tau_{H.B.} + \tau_O) - \\ - 0,003 \cdot (\tau_H + \tau_{H.B.} + \tau_O)^2 + 1,639 \cdot t_O - 0,009 \cdot t_O^2) - R_H - R_{H.B.} \end{array} \right. \quad (6)$$

где R_H – относительная прочность бетона, набранная в процессе нагревания, %;

$R_{H.B.}$ – относительная прочность бетона, набранная в процессе нагревания, %;

R_O – относительная прочность бетона, набранная в процессе остывания, %;

Относительная прочность бетона складывается из прочностей, набранных в процессе нагревания, изотермической выдержки, остывания и может быть вычислена по формуле [6, 8, 10]:

$$R = (\tau_H, \tau_{H.B.}, \tau_O, t_H, t_{H.B.}, t_O) = R_H + R_{H.B.} + R_O \quad (7)$$

Подставляем (4) в (5) и получаем окончательное выражение мультипараметрического уравнения оценки относительной прочности бетона после термической обработки по ТСН 12-336-2007:

$$\begin{aligned} R = (\tau_H, \tau_{H.B.}, \tau_O, t_H, t_O) = & -17,983 + \\ & + 1,639 \cdot t_O + 0,928 \cdot (\tau_H + \tau_{H.B.} + \tau_O) + \\ & + 0,006 \cdot (-\tau_H \cdot \tau_{H.B.} - \tau_H \cdot \tau_O - \tau_{H.B.} \cdot \tau_O) + \\ & + 0,003 \cdot (\tau_H^2 + \tau_{H.B.}^2 + \tau_O^2) - 0,009 \cdot t_O^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Анализ уравнения (8) показывает, что наиболее сильное влияние на формирование относительной прочности бетона оказывает температура остывания t_O (коэффициент регрессии 1,639). Выявлены положительный и отрицательный линейный, а также положительный квадратичный эффекты влияния групп факторов $(\tau_H, \tau_{H.B.}, \tau_O)$, описывающих продолжительность термической обработки. Это свидетельствует о повышении отно-

сительной прочности бетона при изменении продолжительности тепловой обработки от 10 до 170 ч. На характер и силу влияния факторов продолжительности термической обработки τ_n , $\tau_{н.в.}$, τ_o незначительное влияние оказывают их линейные комбинации « $\tau_n \times \tau_{н.в.}$ », « $\tau_n \times \tau_o$ », « $\tau_{н.в.} \times \tau_o$ ».

Применение данного метода нахождения теоретической относительной прочности бетона в значительной степени интенсифицирует процесс выполнения расчета и практически исключает возможные ошибки, возникающие в результате «человеческого фактора». С одной стороны, методика прогноза теоретической прочности бетона по мультипараметрическому уравнению в значительной степени повышает точность расчета. С другой стороны, следует подчеркнуть, что формула (6) учитывает ограниченный круг факторов и не рассматривает процессы, происходящие при структурообразовании бетона, в частности появление внутренних дефектов в связи со сложным термонапряженным состоянием бетонной конструкции.

Таким образом, зная закономерности изменения прочности бетона, можно корректировать температуру и продолжительность термического воздействия на конструкцию. По уравнению (8), кроме относительной прочности, можно вычислить и распалубочную прочность. При соответствующем подходе мультипараметрическое уравнение оценки относительной прочности бетона можно применить при решении большинства инженерных задач в области зимнего бетонирования строительных конструкций.

Следует отметить, что уравнение (8) является эмпирическим и применяется исключительно для бетонов класса В25-В30 с добавками нитрата натрия, С-3 или ПФМ-НЛК, с использованием цемента производства ОАО «Якутцемент» и местных заполнителей (по данным [8]). Поэтому применять уравнение (8) для бетонов с другими характеристиками необходимо с достаточной осторожностью, так как фактические данные рецептуры и свойства исходных компонентов могут существенно отличаться. Пренебрежение данным правилом может привести к недостоверным данным и впоследствии к некорректной оценке относительной прочности бетона.

Следует отметить, что мультипараметрическое уравнение оценки относительной прочности бетона будет наиболее полезно инженерно-техническим работникам, занятым в сфере строительства в условиях Сибири и Крайнего Севера.

Заключение

1. Выполнена компьютерная интерполяция номограмм норм ТСН 12-336-2007 с последующим выводом уравнения регрессии в виде полинома второй степени.

2. Разработан калькулятор расчета относительной прочности бетона на программе Microsoft Office EXCEL 2007, которая в зависимости от продолжительности и температуры термической обработки оценивает величину набора проектного класса прочности в процентном отношении.

3. Полученное мультипараметрическое уравнение успешно апробировано для расчета относительной прочности бетона при зимнем бетонировании объектов жилого комплекса «Прометей» в 2017–2018 гг. (застройщик: ООО «Прометей», Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Чехова, д. 35).

Список литературы

1. Местников А.Е., Егорова А.Д., Корнилов Т.А., Кардашевский А.Г. Технология возведения энергоэффективных стеновых конструкций жилых зданий на Севере // Строительные материалы. 2009. № 4. С. 118–120 [Электронный ресурс]. URL: http://rifsm.ru/u/f/sm-04-09_finish.pdf (дата обращения: 07.11.2018).
2. Турантаев Г.Г. Методы расчетного обоснования параметров зимнего бетонирования строительных конструкций // Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение: сборник материалов III всероссийской научно-практической конференции (Якутск, 2014 г.). Киров: Издательство Международного центра научно-исследовательских проектов, 2014. С. 207–212 [Электронный ресурс]. URL: <https://books.eee-science.ru/downloads/sovremennye-problemy-stroitelstva/> (дата обращения: 07.11.2018).
3. Yudina A., Oganyan R. Technology of winter concreting of monolithic constructions with application of heating cable. 2017. P. 13–18. DOI: 10.23968/2500-0055-2017-2-2-43-48.
4. Ghosh R.S. Winter concreting in Canada. Canadian Journal of Civil Engineering. 2011. no. 2. P. 510–526. DOI: 10.1139/l83-078.
5. Молодин В.В., Лунев Ю.В. Бетонирование монолитных строительных конструкций в зимних условиях: монография. Новосибирск: Издательство НГАСУ, 2006. 300 с.
6. Головнев С.Г., Красный Ю.М., Красный Д.Ю. Производство бетонных работ в зимних условиях. Обеспечение качества и эффективность: монография. М.: Инфра-Инженерия, 2013. 336 с.
7. Головнев С.Г. Зимнее бетонирование: этапы становления и развития // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. № 31–2. С. 529–534.
8. Матвеева О.И., Федорова Г.Д., Винокуров А.Т., Крамсков Н.П. Модифицированные бетоны для подземного строительства // Строительные материалы. 2006. №10. С. 18–19.
9. Баженов Ю.М. [и др.]. Системный анализ в строительном материаловедении: монография. М.: МГСУ, 2012. 432 с.
10. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях в районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера. М.: Стройиздат, 1982. 213 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4293835/4293835918.pdf> (дата обращения: 07.11.2018).