

## **ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА**



УДК 693.547.3:536.4

**В.В. МОЛОДИН, Ю.А. ЧИРКУНОВ, С.Н. ШПАНКО, Е.В. ГАРМС,  
К.Е. ГОРШКОВА, Д.С. КАСЬЯНОВА, А.А. ЛАЗАРЕВ, С.Е. САРАФЯН**

### **НЕЛИНЕЙНЫЕ ПОДМОДЕЛИ, ОПИСЫВАЮЩИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛА ПРИ ЗИМНЕМ БЕТОНИРОВАНИИ КОЛОННЫ ПРИ НАЛИЧИИ ВНЕШНЕГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА**

Уже первые опыты производства бетонных работ в условиях отрицательных температур потребовали ответа на основной вопрос зимнего бетонирования: каким образом обеспечить твердеющему бетону необходимую прочность. Учитывая то, что прочность находится в прямой зависимости от температуры выдерживания, задача ее прогнозирования стала центральной. Многие ученые и практики строительного производства предложили оригинальные методики расчета, однако все они имеют определенные недостатки, что влечет за собой дополнительные и неоправданные расходы. Целью настоящего исследования является получение простых, удобных для практического применения расчетных формул с помощью нелинейных подмоделей, полученных методами группового анализа дифференциальных уравнений, для расчетов температурного поля при зимнем бетонировании строительных конструкций, твердеющих на морозе. В статье приводятся результаты опытного бетонирования фрагмента железобетонной колонны при различных режимах термообработки и сравнение их с расчетными показателями.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** зимнее бетонирование, расчет температурных режимов, нелинейный процесс распространения тепла, экспериментальное и теоретическое исследование, нестационарный источник тепла, подмодели.

DOI 10.32683/0536-1052-2019-732-12-75-86

**Введение.** Переход строительства в начале XX в. к круглогодичному ведению работ потребовал гарантированного качества конструкций, забетонированных в зимних условиях. Это потребовало от строителей умения прогнозировать изменение температуры и нарастание прочности твердеющего бетона. Широко известное линейное дифференциальное уравнение Фурье позволяет определить температуру в любой точке тела, в любой момент времени. Однако аналитическое решение этого уравнения достаточно просто можно получить только для тел идеальной формы – шара, куба, цилиндра.

© Молодин В.В., Чиркунов Ю.А., Шпанко С.Н., Гармс Е.В., Горшкова К.Е., Касьянова Д.С., Лазарев А.А., Сарафян С.Е., 2019

Для реальных строительных конструкций, особенно при решении трехмерной задачи, усугубленной нестационарными теплофизическими характеристиками и экзотермией цемента, задача представляет значительную трудность. Поэтому теоретики зимнего бетонирования искали способы вооружить инженеров простыми, но надежными методиками расчета, удобными для реализации в строительной практике элементарными средствами вычислений, заведомо предполагая неточность результатов.

**Развитие методов прогнозирования температурных режимов твердеющего бетона.** Наиболее практичным оказался предложенный в 1932 г. проф. Б.Г. Скрамтаевым [1] расчет остывания бетона, основанный на уравнении теплового баланса, также обусловленный рядом допущений и ограничений. При этом он достаточно точно описывал тепловой процесс широко распространенного в то время метода «термоса». Метод оказался простым и удобным для практических расчетов. Его модификации можно встретить в практике строительства и по сей день.

Правда расчет не мог прогнозировать перепад температур по сечению конструкции. Априори принималось условие примерного равенства температур по объему. Это значительно упростило расчет. Он был широко признан и включен в технические условия. Следует отметить, что подобный метод расчета был принят и за рубежом.

Последующее развитие технологии, появление новых методов зимнего бетонирования показали существенное расхождение результатов расчетов с фактическими значениями в 2–3 раза [2]. Такие расхождения стимулировали попытки многих авторов [3, 4] модернизировать «формулу Скрамтаева», вводя в нее различные поправки и эмпирические коэффициенты. Однако принятые допущения, существенно облегчавшие расчеты, не могли дать ответ на насущные вопросы производства, особенно в части прогнозирования температурных полей.

Следующим этапом совершенствования методов расчета температурных режимов для зимнего бетонирования явилось предложение ряда ученых [5, 6] адаптировать для нужд строительства теорию регулярного режима Г.М. Кондратьева [7], в основу которой положена экспоненциальная зависимость.

Действительно, полученная при обработке экспериментальных данных линейная аппроксимация логарифма избыточных температур от времени твердения дает возможность применить теорию регулярного режима к охлаждаемым бетонным конструкциям. Споры вызывала продолжительность нерегулярного режима. Как отмечал Г.М. Кондратьев: «Просто она (аналитическая задача) решается только для трех элементарных случаев – пластинки, цилиндра и шара. Стоит немножко усложнить задачу, и мы наталкиваемся на крайне сложные математические операции». Поэтому продолжительность нерегулярного режима по разным основаниям разные авторы [6] рекомендовали принимать условно 0,165–0,333 от продолжительности регулярного.

Появление в 60–70 гг. XX в. доступных широкому кругу специалистов электронно-вычислительных машин и открывшиеся в связи с этим новые возможности привлекли внимание ученых, работавших в области зимнего бетонирования. Новые численные методы расчета позволили изучать любые сложные процессы, рассматривать конструкции сложных очертаний, в том

числе составных и многосвязевых. Появилась возможность учитывать зависимость тепловыделения не только от времени, но и от температуры.

Общеизвестно, что при решении задач теплопроводности при постоянных теплофизических характеристиках применяются как классические методы (метод Фурье, метод разделения переменных или метод тепловых потенциалов), так и методы интегральных преобразований в конечных или бесконечных пределах (методы Лапласа, Меллина, Гринберга и др.). Используя так называемые полуаналитические методы, в которых сочетаются преимущества аналитических и численных методов, в частности операционный метод Лапласа с численными методами обратного преобразования [8], В.И. Зубков [9], основываясь на фундаментальных решениях А.В.Лыкова [10], решил задачу применительно к строительным конструкциям, приводя их к идеальным геометрическим телам – неограниченной пластине, полуограниченному телу, неограниченному цилиндру, а также к системам этих тел.

Полученные решения корреспондируются с экспериментальными данными, позволяют с достаточной точностью прогнозировать температурные поля в твердеющей на морозе бетонной конструкции. Однако метод решения и средства вычисления могли только прогнозировать характер остывания максимально приближенных к реальным конструкциям комбинаций идеальных геометрических тел. Реальное изменение в процессе выдерживания температуры окружающей среды, скорости и направления ветра, других параметров не могло быть учтено. Решения в виде огромных массивов цифр делали метод расчета неудобным для практического применения. Наиболее приемлемым оказалось номографирование. Представление результатов расчетов в виде номограмм было удобным, но существенно снизило точность расчетов. При всех явных недостатках, в части возможностей, метод расчета стал поворотным. Появились предпосылки для контроля и управления температурными процессами выдерживания бетона в конструкциях, твердеющих на морозе.

Бурное развитие в начале XXI в. средств вычислений и методов математического моделирования открыло новые возможности развитию методов прогнозирования температурных режимов бетона, твердеющего в конструкциях, забетонированных в зимних условиях. К этому времени были описаны такие абсолютно устойчивые и абсолютно сходимые явные и неявные разностные схемы численной аппроксимации многомерных дифференциальных уравнений, как схема дробных шагов Н.Н. Яненко [11] и схема переменных направлений Д. Ганна [12], которые позволили решать задачи зимнего бетонирования на основе линейного дифференциального уравнения Фурье [13, 14] и получать решения динамики температурных полей в твердеющем бетоне остывающих и прогреваемых конструкций. Несмотря на высокую результативность, решения оказались настолько громоздкими, что применения в строительной практике не нашли.

Сегодня инженеры строительных компаний для ежедневных расчетов при бетонировании зимой пользуются не очень точными, но простыми в использовании методиками прогнозирования температурных режимов, основанных на весьма грубых приближениях решений линейного дифференциального уравнения Фурье. Это приводит к значительной неточности расчетов. Другой немаловажной причиной такой неточности является тот факт, что нелинейный процесс описывается линейным дифференциальным урав-

нением. В строительной практике неточность расчетов компенсируется увеличением продолжительности термообработки или дополнительным утеплением опалубки, что ведет к значительному удорожанию работ и повышению трудоемкости.

В настоящей работе для исследования процесса зимнего бетонирования используется нелинейная модель распространения тепла в неоднородном стержне при наличии нестационарного источника тепла.

**Нелинейные подмодели распределения температуры в колонне при зимнем бетонировании при наличии внешнего нестационарного источника тепла.** Модель, описывающая нелинейный процесс распространения тепла в неоднородном стержне при наличии нестационарного источника тепла, задается уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( x^\alpha T^\beta \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \gamma(t)T, \quad (1)$$

где  $T = T(t, x)$  – температура стержня в точке  $x \in (-\infty, \infty)$  в момент времени  $t$ ;  
 $\alpha$  – параметр, характеризующий неоднородность стержня;  
 $\beta$  – параметр, характеризующий нелинейность процесса;  
 $\gamma(t) > 0$  – нестационарный коэффициент поступления тепла (в этом коэффициенте также учитывается температуропроводность материала стержня, существенная для нестационарных тепловых процессов);  
 $\alpha$  и  $\beta$  – произвольные вещественные постоянные.

Предполагается, что выполняется условие

$$\alpha\beta\gamma'(t) \neq 0. \quad (2)$$

Это условие означает, что процесс является нелинейным, стержень – неоднородный и имеется нестационарный источник тепла.

Для удобства записи последующих формул введем функцию  $\varepsilon(t)$ , которая связана с функцией  $\gamma(t)$  соотношением:

$$\gamma(t) = \frac{1}{\beta} (\ln(\varepsilon'(t)))', \quad \varepsilon'(t) > 0, \quad (\ln(\varepsilon'(t)))'' \neq 0. \quad (3)$$

Функция  $\varepsilon(t)$  выражается через функцию  $\gamma(t)$  по формуле

$$\varepsilon(t) = k_1 \int \exp \left( \beta \int \gamma(t) dt \right) dt + k_2, \quad (4)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – произвольные вещественные постоянные.

В работе [15] методами группового анализа дифференциальных уравнений [16] были получены 13 существенно различных инвариантных подмоделей, задаваемых точными решениями нелинейного дифференциального уравнения (1) при условиях (2) и (3). Они содержат произвольные параметры  $\alpha$ ,  $\beta$  и функцию  $\varepsilon(t)$ . Эти подмодели могут быть использованы для описания распределения тепла в колонне при зимнем бетонировании при наличии внешнего нестационарного источника тепла. В настоящей работе мы взяли  $\varepsilon(t) = t^2 + t + 1$ , что соответствует экономичному режиму нагрева с зависящим обратно пропорционально от времени нестационарному коэффициенту

поступления тепла  $\gamma(t) = \frac{1}{\beta(t+0,5)}$ . Для расчетного описания экспериментов мы использовали следующие две подмодели распределения температуры в колонне.

– Подмодель, для которой точное значение температуры определяется по формуле

$$T_{1, \text{exact}}(t, x) = x^{\frac{1-\alpha}{\beta+1}} (\varepsilon'(t))^{\frac{1}{\beta}}. \quad (5)$$

– Подмодель, для которой точное значение температуры вычисляется по формуле

$$T_{10, \text{exact}}(t, x) = (\varepsilon'(t))^{\frac{1}{\beta}} x^{\frac{1}{\beta+1}}. \quad (6)$$

Целью дальнейшего исследования является определение значений параметров  $\alpha$  и  $\beta$ , при которых эти подмодели адекватно описывают выполненные авторами статьи эксперименты.

**Описание экспериментальных исследований.** Экспериментальные исследования температурных полей в бетонируемой конструкции осуществлялись путем измерения температур в модельном теле колонны квадратного сечения  $200 \times 200$  мм и высотой 1000 мм (рис. 1, а). Опалубка конструкции выполнена из фанеры, ламинированной ФСФ 18 мм (ГОСТ 3916.1–96), толщиной 18 мм. В качестве нагревателя использовался широко применяющийся в производственных условиях греющий провод.

Греющий провод ПНСВ, диаметром 1,6 мм с теплостойкой электроизоляцией из поливинилхлорида толщиной 0,8 мм (ГОСТ ТУ 16.К71-013–88) длиной петли 50 м, фиксировался на внутренней поверхности опалубки с шагом 20 мм по всем боковым граням (рис. 1, б), включался в электрическую сеть, с напряжением 220 В. Изменение электрической мощности осуществлялось

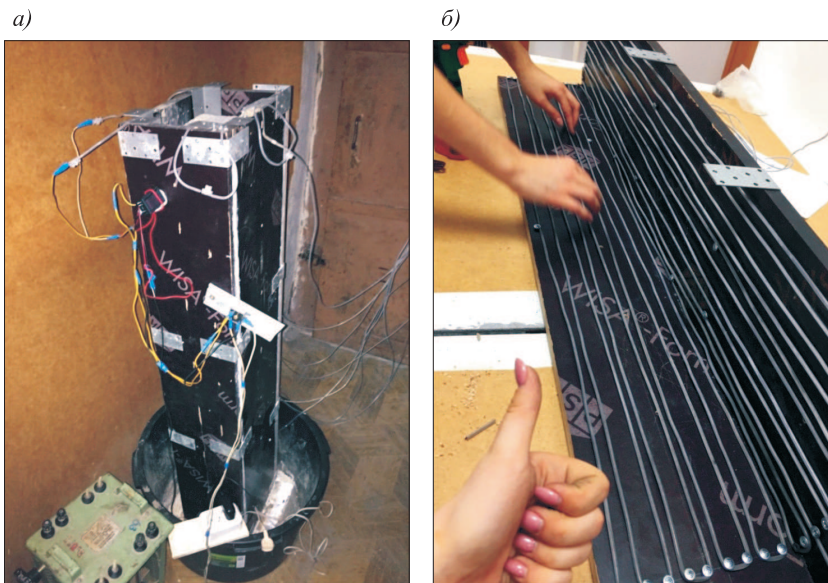


Рис. 1. Общий вид лабораторной модели колонны (а) и расположение греющего провода на внутренней поверхности опалубки (б)

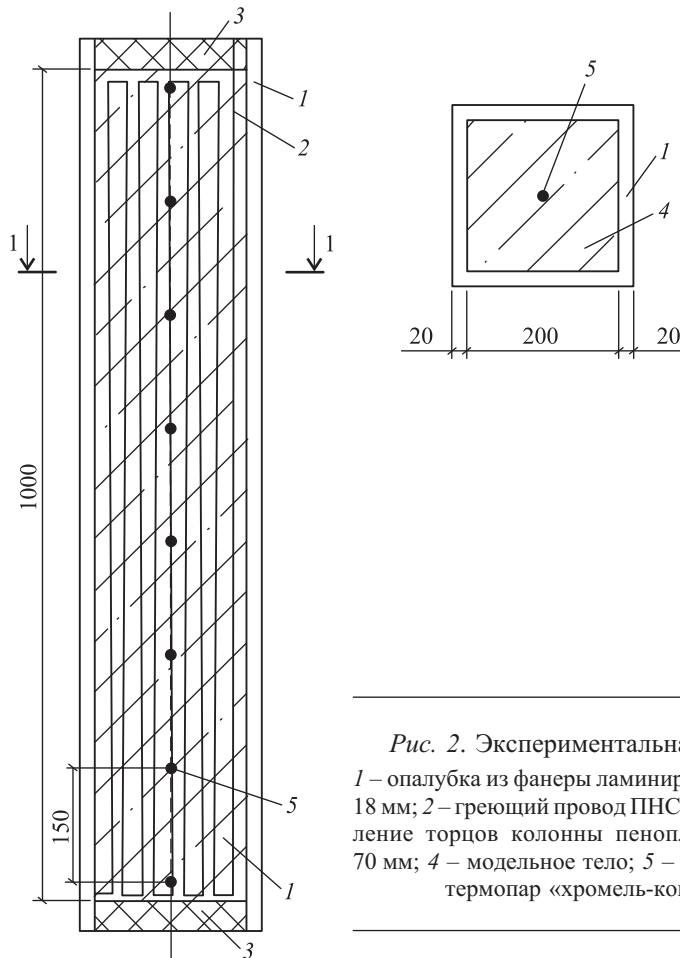


Рис. 2. Экспериментальная модель  
 1 – опалубка из фанеры ламинированной ФСФ 18 мм; 2 – греющий провод ПНСВ 1,6; 3 – утепление торцов колонны пенопластом ПСБС 70 мм; 4 – модельное тело; 5 – термоствор из термопар «хромель-копель»

при помощи лабораторного автотрансформатора АОСН-20-220-75УХЛ4. Расположение термодатчиков указано на рис. 2.

В центре колонны располагался термоствор из хромель-копелевых термопар (ГОСТ 6616–74) с шагом 150 мм. Модель помещалась в холодильную камеру АК-2ФР, блок управления которой предусматривает регулировку рабочей температуры в пределах от 0 до  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для удобства проведения исследований различных режимов термообработки конструкции и исключения влияния экзотермии цемента в качестве бетонной смеси использовалось модельное тело (табл. 1). Оно представляло собой смесь, состоящую из тех же материалов и принятых в тех же соотношениях, что и бетонная смесь, с той разницей, что вместо цемента был использован молотый песок с удельной поверхностью  $S_{уд} = 2900\text{ см}^2/\text{г}$ , равной удельной поверхности цемента. Такой материал был получен на лабораторной шаровой мельнице. Для выравнивания электрофизических свойств в состав добавлялся  $\text{NaCl}_2$ . Водоудерживающую способность смеси обеспечивала добавка бентонитовой глины. Модельное тело, приготовленное в лаборатории, по своим физическим параметрам – масса, жесткость, теплофизические характеристики, удельное сопротивление – практически не отличалось от реальных бетонных смесей. Начальная температура смеси составляла  $22,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 1. Состав модельного тела, принятого для исследования

Материалы	Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> , кг	
	стандартный бетон В 22,5	модельное тело
Щебень диабазовый ФР 5-20. ГОСТ 10268–70	1250	1250
Песок кварцевый речной Криводановского карьера Мкр = 1,8. ГОСТ 10268–70	530	530
Портландцемент М 400. ГОСТ 10178–68	450	–
Молотый песок ( $S_{уд} = 2900 \text{ см}^2/\text{г}$ )	–	450
Вода техническая. ГОСТ 2874–54	180	180
Объемная масса бетона, кг/м <sup>3</sup>	2410	2410

Были выполнены следующие эксперименты, которые различаются мощностью нагрева колонны:

- 1 – малая мощность: напряжение 11 В; сила тока 3 А,
- 2 – средняя мощность: напряжение 27,3 В; сила тока 6,21 А,
- 3 – большая мощность: напряжение 37,8 В; сила тока 9,19 А.

Нагрев происходил в течение 25 ч. Все термомпары при нагреве показывали практически одинаковую температуру, которую мы будем обозначать далее через  $T_{n, \text{exp}}$ , где  $n = 1$  для малой мощности нагрева,  $n = 2$  для средней мощности нагрева,  $n = 3$  для большой мощности нагрева.

**Сравнение результатов экспериментальных исследований с расчетными показателями.** На всех приведенных ниже графиках (рис. 3–13) экспе-

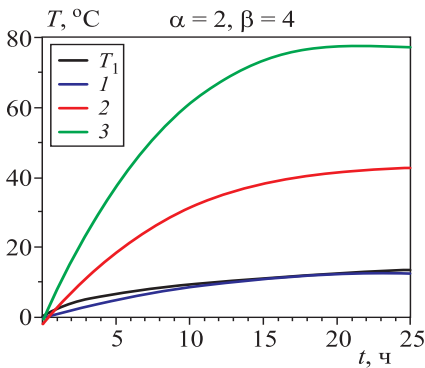


Рис. 3

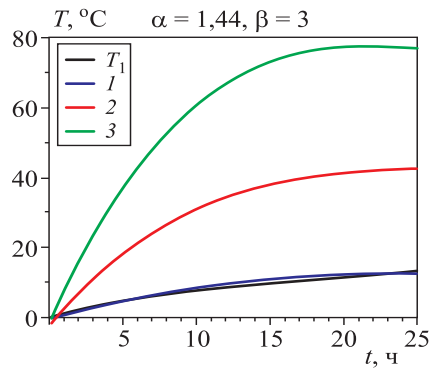


Рис. 4

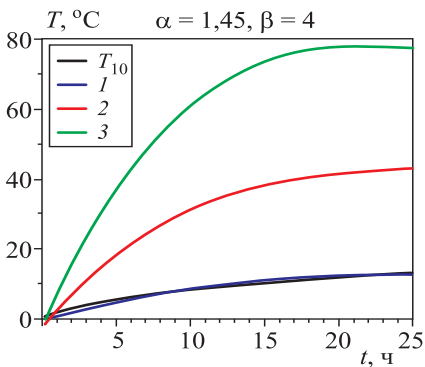


Рис. 5

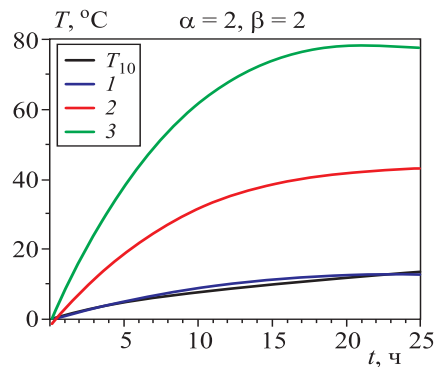
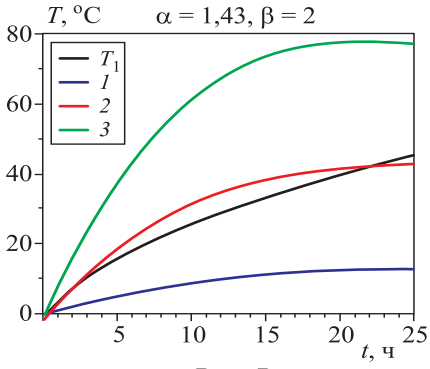
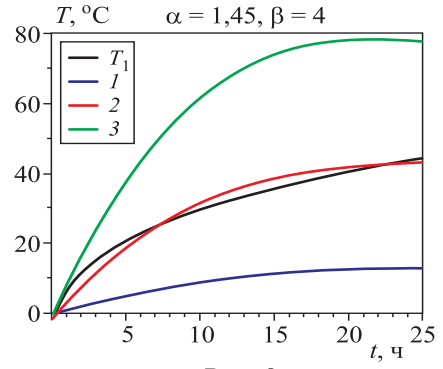


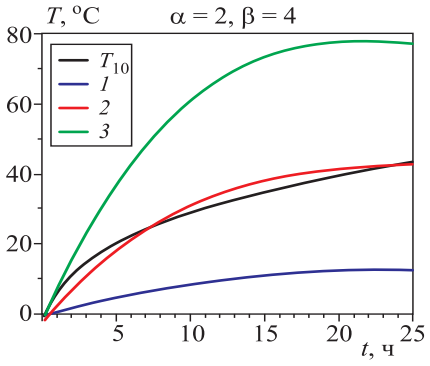
Рис. 6



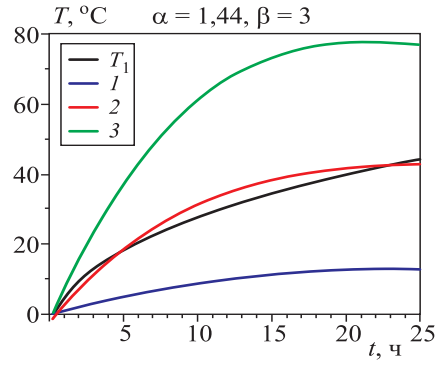
*Рис. 7*



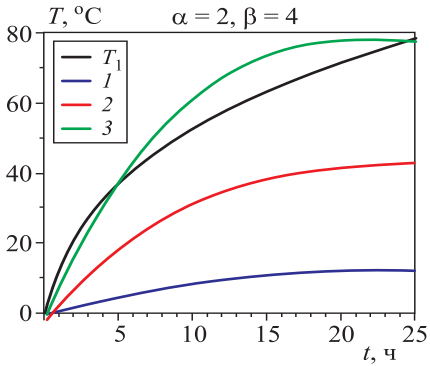
*Рис. 8*



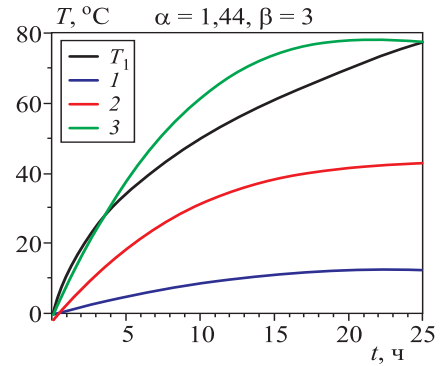
*Рис. 9*



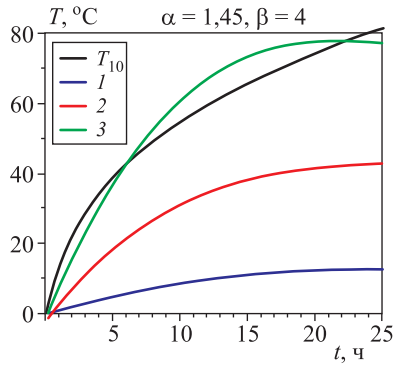
*Рис. 10*



*Рис. 11*



*Рис. 12*



*Рис. 13*



риментальные кривые описывают приращение температуры  $T = T_{n, \text{exp}} - 22,2^\circ$ . Этим графикам присвоен номер  $n$  в зависимости от мощности нагрева. Ввиду нелинейности уравнения (1) его точные решения (5), (6) заведомо не могут аппроксимировать эти приращения температуры. Поэтому для получения расчетных формул, аппроксимирующих эти приращения, в формулы (5), (6) вводятся поправочные аддитивные слагаемые и коэффициенты по формуле

$$T_n = \lambda T_{n, \text{exact}}(t; 0,5) - \mu \quad (n = 1,10), \quad (7)$$

где числа  $\lambda$  и  $\mu$  принимают конкретные значения для каждой расчетной формулы (7). Вообще говоря, это является обычной практикой применения полученных теоретических формул для описания реальных процессов. Наилучшую аппроксимацию для случая трех разных мощностей прогрева дают расчетные формулы, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные формулы для прогрева при разных мощностях

График №	Коэффициент		Расчетная формула (7)	Расчетная кривая
	$\alpha$	$\beta$		
Случай малой мощности, 33ВА				
3	2,0	4,0	$T_1 = 7T_{1, \text{exact}}(t; 0,5) - 8$	$T = T_1$
4	1,44	3,0	$T_1 = 5T_{1, \text{exact}}(t; 0,5) - 7$	$T = T_1$
5	1,45	4,0	$T_{10} = 8T_{10, \text{exact}}(t; 0,5) - 10$	$T = T_{10}$
6	2,0	2,0	$T_{10} = 2T_{10, \text{exact}}(t; 0,5) - 3$	$T = T_{10}$
Случай средней мощности, 169,5 ВА				
7	1,43	2,0	$T_1 = 7T_{1, \text{exact}}(t; 0,5) - 10$	$T = T_1$
8	1,45	4,0	$T_1 = 26T_{1, \text{exact}}(t; 0,5) - 30$	$T = T_1$
9	2,0	4,0	$T_{10} = 25T_{10, \text{exact}}(t; 0,5) - 29$	$T = T_{10}$
10	1,44	3,0	$T_{10} = 15T_{10, \text{exact}}(t; 0,5) - 19$	$T = T_{10}$
Случай большой мощности, 347,4 ВА				
11	2,0	4,0	$T_1 = 42T_{1, \text{exact}}(t; 0,5) - 51$	$T = T_1$
12	1,44	3,0	$T_1 = 27T_{1, \text{exact}}(t; 0,5) - 31$	$T = T_1$
13	1,45	4,0	$T_{10} = 45T_{10, \text{exact}}(t; 0,5) - 50$	$T = T_{10}$

**Заключение.** В результате исследований установлено:

1. Принятые для исследования две подмодели точного решения нелинейного дифференциального уравнения, описывающего нелинейный процесс распространения тепла в неоднородном стержне при наличии нестационарного источника тепла, и полученные на их основе расчетные формулы адекватно описывают результаты экспериментов.

2. Особенно точное описание получилось при малой и средней мощности нагрева.

3. Цель настоящего исследования достигнута. Доказана возможность использования для практического применения в строительном производстве

расчетных формул, полученных с помощью нелинейных подмоделей, найденных методами группового анализа дифференциальных уравнений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Луцкой С.Я. и др. Технология строительного производства: Справ. М.: Высш. шк., 1991. 384 с.
2. Арбенев А.С., Лысов В.П. Определение времени остывания бетона при зимнем бетонировании // Бетон и железобетон. 1971. № 6. С. 6–8.
3. Кириенко И.А. Бетонные, каменные и штукатурные работы на морозе. Киев: Госстройиздат УССР, 1962. 272 с.
4. Савалов И.Г. Бетонные работы. М.: Стройиздат, 1952.
5. Головнев С.Г. и др. Зимнее бетонирование на Южном Урале. Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 1974. 135 с.
6. Вальт А.Б., Головнев С.Г., Самойлович Ю.З. Расчет времени остывания бетонных конструкций при отрицательных температурах // Совершенствование технологии строительного производства. Томск: Изд-во ТГУ, 1978. С. 33–34.
7. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. М.: ГИТТЛ, 1954. 408 с.
8. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы нестационарной теплопроводности. М.: Высш. шк., 1978. 328 с.
9. Зубков В.И. Зимнее бетонирование гидротехнических сооружений: Учеб. пособие. Новосибирск: НИСИ, 1988. 86 с.
10. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 599 с.
11. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск: Изд-во НГУ, 1966. 364 с.
12. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971. 550 с.
13. Попов Ю.А., Лунев Ю.В., Шалгунова О.А. Математическое моделирование динамики температурного и прочностного полей при дифференцированном прогреве бетона в строительных конструкциях призматической формы // Изв. вузов. Стр.-во. 2005. № 4. С. 73–78.
14. Молодин В.В., Лунев Ю.В. Бетонирование монолитных строительных конструкций в зимних условиях. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2006. 300 с.
15. Чиркунов Ю.А. Нелинейное распространение тепла в неоднородном стержне при воздействии нестационарного источника тепла применительно к задачам зимнего бетонирования // Изв. вузов. Стр.-во. 2018. № 2. С. 70–76.
16. Чиркунов Ю.А., Хабиров С.В. Элементы симметричного анализа дифференциальных уравнений механики сплошной среды. Новосибирск: НГТУ, 2012. 659 с.

**Молодин Владимир Викторович**, д-р техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Чиркунов Юрий Александрович**, д-р физ.-мат. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Шпанко Сергей Николаевич**, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Гармс Елизавета Владимировна**, студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Горшкова Ксения Евгеньевна**, студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Касьянова Дарья Сергеевна**, студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Лазарев Александр Андреевич**, студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**Сарафян Сюзанна Есаевна**, студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 26.11.2019

**Molodin Vladimir Viktorovich**, DSc, Ass. Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Chirkunov Yuri Alexandrovich**, DSc, Ass. Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Shpanko Sergey Nikolaevich**, PhD, Ass. Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Garms Elizaveta Vladimirovna**, Student

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Gorshkova Kseniya Evgenievna**, Student

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Kasyanova Daria Sergeevna**, Student

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Lazarev Alexander Andreevich**, Student

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Sarafyan Suzanna Esaivna**, Student

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **NONLINEAR SUBMODELS DESCRIBING THE DISTRIBUTION OF HEAT FOR WINTER CONCRETING OF THE COLUMN WITH THE EXISTENCE OF AN EXTERNAL UNSTEADY HEAT SOURCE**

Already the first experiments in concrete work at low temperatures required an answer to the basic question of winter concreting – how to provide hardening concrete with the necessary strength. Considering the fact that the strength is directly dependent on the temperature of aging, the task of its forecasting has become central. Many scientists and practitioners of building production have proposed original methods of calculation, but they all have certain disadvantages, which entails additional and unjustified costs. The aim of this study is to obtain simple, convenient for practical application of calculation formulas using nonlinear submodels obtained by group analysis of differential equations for calculating the temperature field during winter concreting of building structures hardening in the cold. The article presents the results of experimental concreting of a fragment of a reinforced concrete column at various heat treatment modes and their comparison with the calculated indices.

**Key words:** winter concreting, calculation of temperature conditions, non-linear process of heat distribution, experimental and theoretical research, non-stationary heat source, submodels.

### REFERENCES

1. Luts'koy S.Ya. et al. *Technologiya stroitel'nogo proizvodstva*. Spravochnik [Technology of construction production. Directory]. Moscow, 1991. 384 p. (in Russian)
2. Arben'ev A.S., Lysov V.P. *Opreделение vremeni ostyvaniya betona pri zimnem betonirovanii* [Determination of concrete cooling time during winter concreting]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 1971. No. 6. Pp. 6–8. (in Russian)

3. Kirienko I.A. Betonnye, kamennye i shtukaturnye raboty na moroze [Concrete, stone and plaster work in the cold]. Kiev, Gosstroyizdat USSR, 1962. 272 p. (in Russian)
4. Sovolov I.G. Betonnye raboty [Concrete works]. Moscow, Stroyizdat, 1952. (in Russian)
5. Golovnev S.G. et al. Zimnee betonirovanie na Yuzhnom Urale [Winter concreting in the South Urals]. Chelyabinsk, 1974. 135 p. (in Russian)
6. Val't A.B., Golovnev S.G., Samoylovich Yu.Z. Raschet vremeni ostyvaniya betonnykh konstruksiy pri otritsatel'nykh temperaturakh [Calculation of the cooling time of concrete structures at low temperatures]. Sovershenstvovanie tekhnologii stroitel'nogo proizvodstva [Improvement of construction technology]. Tomsk, 1978. Pp. 33–34. (in Russian)
7. Kondratiev G.M. Regulyarnyy teplovoy rezhim [Regular thermal conditions]. Moscow, 1954. 408 p. (in Russian)
8. Belyaev N.M., Ryadno A.A. Metody nestatsionarnoy teploprovodnosti [Methods of non-stationary thermal conductivity]. Moscow, 1978. 328 p. (in Russian)
9. Zubkov V.I. Zimnee betonirovanie gidrotekhnicheskikh sooruzheniy: uchebnoe posobie [Winter concreting of hydraulic structures: a training manual]. Novosibirsk, 1988. 86 p. (in Russian)
10. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti [Heat conduction theory]. Moscow, 1967. 599 p. (in Russian)
11. Yanenko N.N. Metod drobnnykh shagov resheniya mnogomernykh zadach matematicheskoy fiziki [The method of fractional steps for solving multidimensional problems of mathematical physics]. Novosibirsk, 1966. 364 p. (in Russian)
12. Samarskiy A.A. Vvedenie v teoriyu raznostnykh skhem [Introduction to difference theory]. Moscow, 1971. 550 p. (in Russian)
13. Popov Yu.A., Lunev Yu.V., Shalgunova O.A. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki temperaturnogo i prochnostnogo polya pri differentsirovannom progreve betona v stroitel'nykh konstruksiyakh prizmaticheskoy formy [Mathematical modeling of the dynamics of temperature and strength fields during differentiated heating of concrete in prismatic building structures]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2005. No. 4. Pp. 73–78. (in Russian)
14. Molodin V.V., Lunev Yu.V. Betonirovanie monolitnykh stroitel'nykh konstruksiy v zimnikh usloviyakh [Concreting of monolithic building structures in winter conditions]. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2006. 300 p. (in Russian)
15. Chirkunov Yu.A. Nelineynoe rasprostranenie tepla v neodnorodnom sterzhne pri vozdeystvii nestatsionarnogo istochnika tepla primenitelno k zadacham zimnego betonirovaniya [Nonlinear dissemination of heat in the inhomogeneous rod under the influence of a non-stationary source of heat with application to the problems of winter concreting]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2018. No. 2. Pp. 70–76. (in Russian)
16. Chirkunov Yu.A., Khabirov S.V. Elementy simmetriynogo analiza differentsial'nykh uravneniy mekhaniki sploshnoy sredy [The Elements of Symmetry Analysis of Differential Equations of Continuous Medium Mechanics]. Novosibirsk, NGTU, 2012. 659 p. (in Russian)