

# О НАГРЕВЕ МАГНИТНОЙ ФОРМЫ ОСТЫВАЮЩЕЙ ОТЛИВКОЙ

Г. Е. Левшин, А. А. Карих

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,  
г. Барнаул, Россия

В работах [1 – 4] показано отсутствие реально работающей математической модели прогрева магнитной формы (МФ) и рассмотрены подробно причины этого. В известных моделях отливка рассматривается как неиссякаемый источник тепла [3 – 6]. Однако после ее затвердевания (при времени  $t_{затв}$  и глубине  $x_{фmax}$ ) форма прогревается затухающим источником тепла – остывающей отливкой [1 – 4, 7, 8].

Эти модели используют экспериментальные результаты «метода заливки», т. е. изменение во времени показания нескольких термомпар, установленных на разных расстояниях  $x_{ф}$  от отливки [1, 6]. Но из-за серьезных трудностей при размещении термомпар для измерения температур поверхностей  $T_{отл}^n$  отливки и формы  $T_{ф}^n$  нередко исследователи не измеряют эти важные температуры [1, 5, 6].

Поэтому представляет практический интерес расчетное определение температур  $T_{ф}$  (на заданной глубине  $x_{ф}$ ) и  $T_{отл}^n$  (на поверхности формы) в любой момент времени путем создания математического описания функции  $T_{ф} = f(x_{ф})$ .

Для этого использовали измеренные температуры неполой (с газифицируемой моделью) МФ из дроби ДСК 08 для отливки «плиты»  $150 \times 150 \times 15$  мм из чугуна СЧ20, полностью затвердевшей при  $t_{затв} = 180$  с [3, 5, 7]. Термомпары размещены в центре отливки и на расстояниях  $x_{ф} = 4, 8, 12, 22$  и  $50$  мм от отливки (в одной плоскости).

По исходной базе данных с помощью программы Microsoft Excel построили графики охлаждения отливки и прогрева формы для:

– упомянутых расстояний  $x_{ф}$  от отливки в зависимости от времени  $t$  (рисунок 1);

– нескольких значений времени  $t$  в зависимости от упомянутых расстояний  $x_{ф}$  (рисунок 2). Затем на этих рисунках разместили и дополнительные графики, в которых числовые значения величин, необходимые для их построения, рассчитаны методом интерполяции по формуле Лагранжа для трех точек [7, 8]. При этом интерполяцию проводили с использованием функции  $T_{ф} = f(t)$ , а полученные

числовые значения вносили в базу данных, которую назвали полной.

Неизмеренную температуру поверхности  $T_{отл}^n$  отливки вычислили (для необходимого времени  $t$ ) по формуле А. И. Вейника [1, 6] с использованием измеренного значения температуры  $T_{отл}^c$  в центре отливки.

Теплоаккумуляцию  $b_{отл}$  для серого чугуна приняли постоянной  $14000 \frac{B_r \cdot c^{0.5}}{m^2 \cdot K}$  [6]. Теплоаккумуляцию же формы определяли двумя путями как:

1) постоянную величину эффективной теплоаккумуляции  $b_{эф} = 1200 \frac{B_r \cdot c^{0.5}}{m^2 \cdot K}$ , определенную в этом эксперименте при  $t_{затв}$  (таблица 1,  $T_{отл}^n$  строка 1);

2) переменную величину  $b_{ф}$  для измеренного текущего значения  $T_{ф}$  на ближайшей к отливке глубине  $x_{ф} = 4$  мм в этот же момент времени по формуле (1) зависимости локальной теплоаккумуляции  $b_{ф}$  от температуры (таблица 1, строка 2 для  $T_{отл}^n$ ) [2].

$$b_{ф} = 0,86976 T_{ф} + 732,78 \quad (1)$$

Сравнение полученных расчетом двух значений  $T_{отл}^n$  (таблица 1, строки 1 и 2) показывает их небольшую разницу (кроме значений при  $180 - 240$  с, выделенных жирно) для одинакового времени и соответствие известным закономерностям убывания температуры от центра отливки к ее поверхности. Так, при  $0$  с разность  $(T_{отл}^c - T_{отл}^n)$  составляет  $59^{\circ}C$  и уменьшается до  $7 - 8^{\circ}C$  при  $390$  с.

Чтобы точнее рассмотреть прогрев МФ до затвердевания отливки и сразу же после него, сначала использовали исходную базу данных (но без температур при  $x_{ф} = 50$  мм для периода времени до  $210$  мин) и вычисленные по обоим вариантам значения температуры поверхности отливки  $T_{отл}^n$  (таблица 1). Приняв допущение [6] о равенстве температур поверхности МФ  $T_{ф}^n$  и отливки  $T_{отл}^n$ , получили с помощью программы Microsoft Excel графические зависимости  $T_{ф} = f(x_{ф})$  на рисун-

## О НАГРЕВЕ МАГНИТНОЙ ФОРМЫ ОСТЫВАЮЩЕЙ ОТЛИВКОЙ

ке 2 и квадратные уравнения их аппроксимации параболического вида (таблица 2, графа 2). Температура  $T_{отл}^n$  поверхности отливки ограничивает значение температуры поверхности формы  $T_{\phi}^n$  в этих уравнениях, т. к.  $T_{\phi}^n$  не может быть больше  $T_{отл}^n$ .

Анализ графиков (рисунок 2) и уравнений их аппроксимации (таблица 2, графа 2) показывает, что:

1) начальные участки многих графиков весьма близки к прямолинейным, что облегчает вычисление градиента температуры;

2) глубина прогрева  $x_{\phi max}$  в момент  $t_{затв} = 180$  с составляет  $\sim 27,5$  мм;

3) эти уравнения позволяют вычислить температуру  $T_{\phi}$  и ее градиент для любого значения  $t$  и использовать их для анализа прогрева МФ отливками из чугуна с близкой толщиной стенки. Последний член этих уравнений позволяет оценить и температуру  $T_{\phi}^n$  поверхности формы;

4) температуры поверхностей  $T_{отл}^n$  отливки и  $T_{\phi}^n$  формы не всегда равны друг другу и не являются постоянными величинами, что не подтверждает теоретическое допущение [6] об их постоянстве (особенно для реальных отливок, заливаемых с перегревом расплава). Нередко температура  $T_{\phi}^n$  МФ превышает температуру  $T_{отл}^n$  отливки (таблица 1), что свидетельствует о недостаточной достоверности уравнений;

5) в слое  $x_{\phi} = 10 - 15$  мм при  $t \geq 240$  с появляется труднообъяснимый выпуклый изгиб кривых прогрева, уменьшающий достоверность описания процесса прогрева вогнутой квадратичной параболой;

6) левая ветвь вогнутых парабол в диапазоне  $10 - 210$  с имеет различный вид и увеличивающийся наклон к оси температур, что свидетельствует об уменьшении показателя параболы  $n_{\phi}$  в уравнениях Вейника А. И. [6] с 2,1 (при 10 с) практически до 0 (при  $t = 210$  с). Он рекомендует  $n_{\phi} = 2$  для многих случаев разовой песчаной формы [6]. Это еще одна причина выбора для аппроксимации квадратичной параболы.

Для дополнительной проверки и большей достоверности оценки неравенства температур поверхностей отливки и формы в предыдущую базу данных добавили экспе-

риментальные значения температуры  $T_{\phi}$  при  $x_{\phi} = 50$  мм (для моментов времени до 210 с), построили графики  $T_{\phi} = f(x_{\phi})$  и получили квадратные уравнения их аппроксимации, сведенные в таблице 2 (графа 3). Большинство из этих уравнений также показывают неадекватное превышение температур  $T_{\phi}^n$  МФ над температурами  $T_{отл}^n$  отливки (таблица 1), что свидетельствует об их неполной достоверности.

Для устранения допущения о равенстве температур  $T_{отл}^n$  и  $T_{\phi}^n$  из предыдущей базы данных исключили температуру  $T_{отл}^n$  и построили графики  $T_{\phi} = f(x_{\phi})$ , начинающиеся со значения  $x_{\phi 1} = 1$  мм. По этим графикам получили аналогичные квадратные уравнения их аппроксимации (таблица 2, графа 4). При этом температура  $T_{\phi}^n$  получилась продолжением графиков. Однако в некоторых уравнениях температура  $T_{\phi}^n$  по-прежнему выше  $T_{отл}^n$ .

Анализ аппроксимирующих квадратных уравнений таблицы 2 показывает, что их достоверности отличаются, а именно:  $R^2 = 0,9658 - 0,9997$  для уравнений графы 2;  $0,8874 - 0,9995$  для уравнений графы 3;  $0,8983 - 0,9993$  для уравнений графы 4. Однако они являются недостаточными в ряде случаев (выделены жирно в таблице 1) для точного вычисления величины  $T_{\phi}^n$  но могут быть использованы в приближенных расчетах  $T_{\phi}$ .

Достоверность таких уравнений повысили увеличением их степени при тех же исходных данных. Полиномиальные уравнения 3 - 6 степени, полученные перебором, приведены в таблице 3. Они действительно повышают достоверность аппроксимации до  $R^2 = 0,9981 - 1,0$  (за исключением  $t = 10$  с) и обеспечивают более адекватные значения температур  $T_{\phi}^n$  поверхности МФ на  $2 - 33$  °C ниже температур  $T_{отл}^n$  отливки (таблица 1).

Из графиков (рисунки 1 и 2) можно определить, что за 10 с слой  $x_{\phi} = 1$  мм нагревается до  $920$  °C со скоростью  $\sim 90$  °C/с и градиентом  $\sim 900$  °C/мм; слой  $x_{\phi} = 2$  мм - до  $T_{\phi} = 660$  °C со скоростью  $\sim 64$  °C/с и градиентом  $\sim 320$  °C/мм, слой  $x_{\phi} = 3$  мм - до  $T_{\phi} = 460$  °C со скоростью  $\sim 44$  °C/с и градиентом  $\sim 143$  °C/мм, а слой  $x_{\phi} = 4$  мм - до  $T_{\phi} = 280$  °C со скоростью  $\sim 26$  °C/с и градиентом  $\sim 65$  °C/мм и т. д.

Проверка адекватности исследованных уравнений при расчете по ним температуры  $T_{\phi}$  для  $x_{\phi} = 22$  мм при времени  $t = 180$  и  $240$  с показала наибольшее приближение расчетных температур  $146$  и  $225$  °С к экспериментальным значениям  $T_{\phi} = 150$  и  $236$  °С для полиномиальных уравнений из таблицы 3. Погрешность всего 3 – 5 %.

Средне-интегральную температуру  $T_{нсл}$  нагрева слоя  $x_{\phi}=50$  мм, равного толщине стенки формы, при выбивке отливки по истечении времени  $t = 390$  с получают после интегрирования последнего из уравнений таблицы 3 и деления результата на  $x_{\phi}=50$  мм. Она составляет  $\sim 407$  °С и является исходной для разработки технологии охлаждения МФМ.

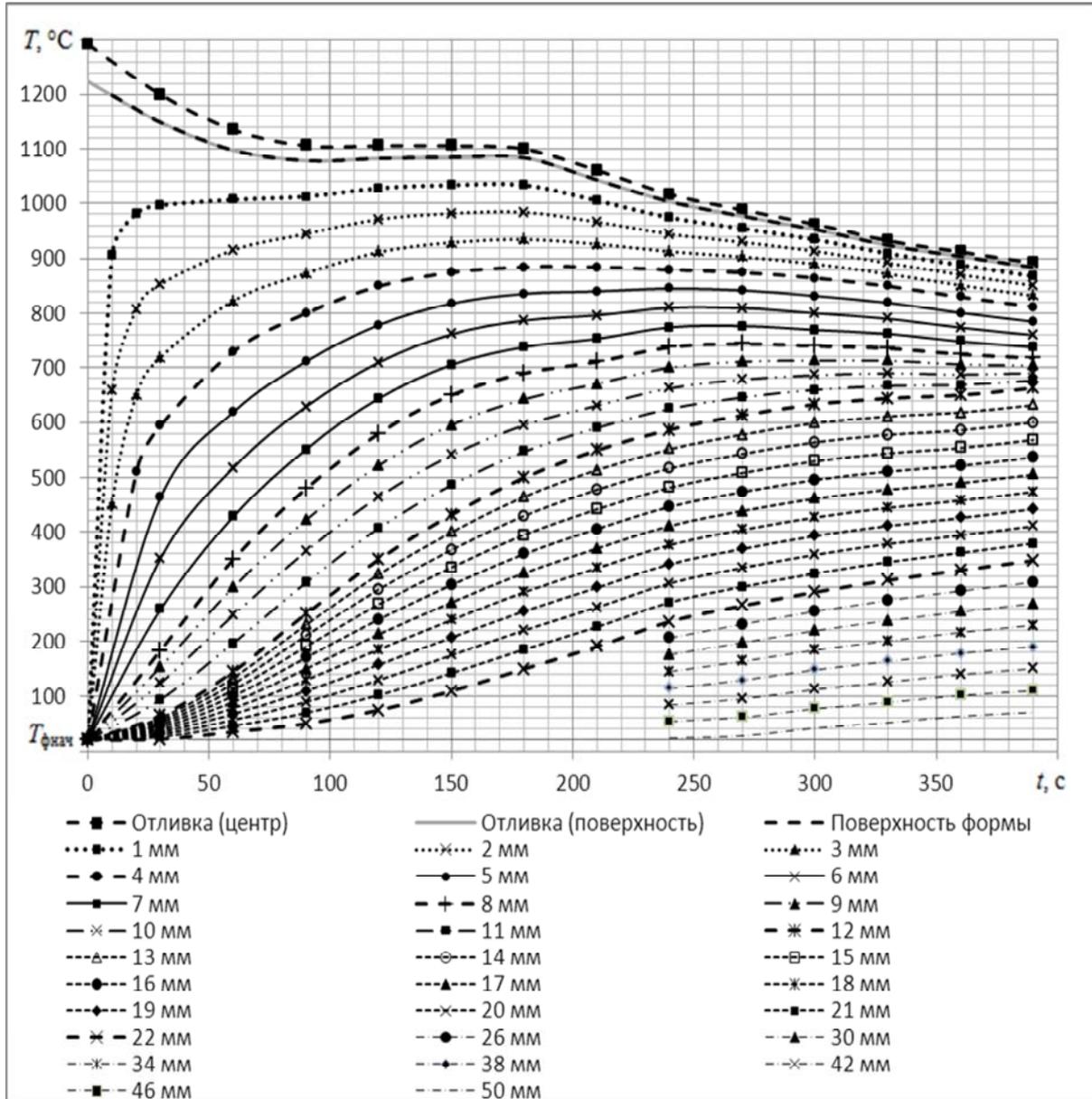


Рисунок 1 – Температурное поле отливки и формы (экспериментальные и интерполяционные графики)

## О НАГРЕВЕ МАГНИТНОЙ ФОРМЫ ОСТЫВАЮЩЕЙ ОТЛИВКОЙ

Таблица 1 – Температуры отливки и поверхности формы

T, °C	Время, с														
	10	20	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	390
$T_{отл}^ц$	1261	1228	1200	1135	1106	1106	1106	1100	1068	1040	988	962	932	912	892
$T_{отл}^п$	1199	1174	1149	1098	1079	1083	1085	<b>1084</b>	<b>1044</b>	<b>1004</b>	977	952	924	904	884
	1203	1176	1150	1099	1078	1082	1084	<b>1079</b>	<b>1050</b>	<b>1025</b>	977	953	924	904	885
$T_{\phi}^п$	1126	1152	1127	1114	<b>1101</b>	<b>1102</b>	<b>1098</b>	<b>1089</b>	1048	<b>1041</b>	<b>1018</b>	<b>994</b>	<b>966</b>	<b>940</b>	<b>917</b>
	1026	1116	932	1020	1064	<b>1097</b>	<b>1108</b>	<b>1105</b>	<b>1078</b>	<b>1047</b>	<b>1026</b>	<b>1002</b>	<b>974</b>	<b>946</b>	<b>946</b>
	909	1149	992	1042	1068	<b>1093</b>	<b>1102</b>	<b>1099</b>	<b>1069</b>	<b>1035</b>	<b>1012</b>	<b>988</b>	<b>960</b>	<b>934</b>	<b>909</b>
	1187	1170	1116	1067	1060	1073	1078	1080	1039	1002	972	943	913	892	872

Примечания.

1. Температура  $T_{отл}^п$  в строке 1 вычислена по формуле (1) с использованием  $b_{эф}$ , а в строке 2 - с использованием  $b_{\phi}$ .

2.  $T_{\phi}^п$  в строке 1, 2, 3 из таблицы 2, графы 2, 3, 4, соответственно, а в строке 4 из таблицы 3.

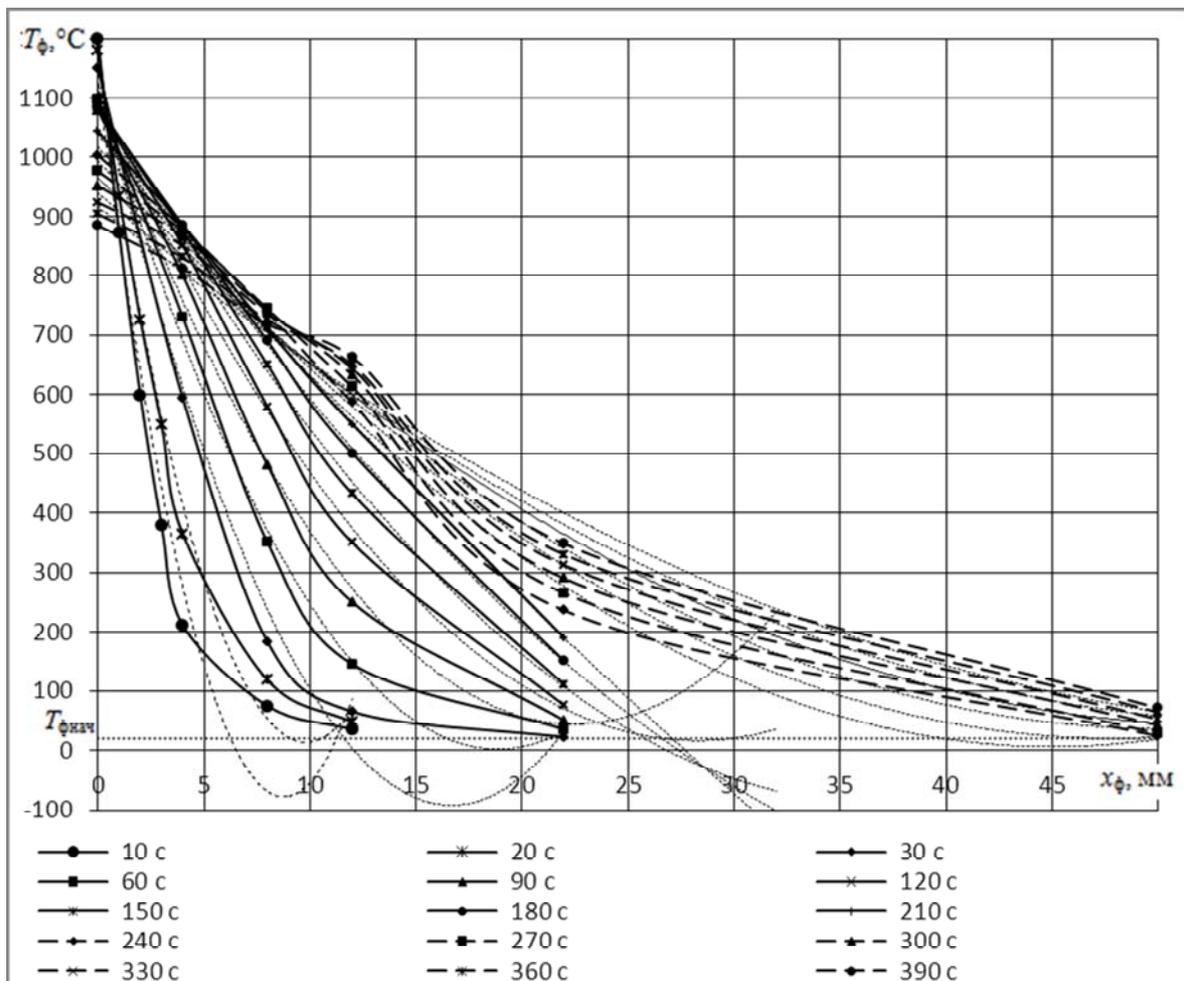


Рисунок 2 – Зависимости температуры  $T_{\phi}$  формы от расстояния  $x_{\phi}$  от отливки (линии аппроксимации показаны пунктиром)

Таблица 2 – Квадратные уравнения аппроксимации зависимости  $T_{\phi}=f(x_{\phi})$

Время, с	По графикам рисунка 2	С использованием $T_{\phi}^{\text{отл}}$	Без использования $T_{\phi}^{\text{отл}}$ (рисунок 3)
10	$T_{\phi} = 15,689x_{\phi}^2 - 274,91x_{\phi} + 1126,1, R^2 = 0,9658$	$T_{\phi} = 13,08x_{\phi}^2 - 236,68x_{\phi} + 1026,3, R^2 = 0,9507$	$T_{\phi} = 0,2197x_{\phi}^2 - 27,887x_{\phi} + 909,35, R^2 = 0,9882$
20	$T_{\phi} = 11,815x_{\phi}^2 - 232,01x_{\phi} + 1152,2, R^2 = 0,9922$	$T_{\phi} = 10,861x_{\phi}^2 - 218,03x_{\phi} + 1115,7, R^2 = 0,9892$	$T_{\phi} = 11,727x_{\phi}^2 - 230,71x_{\phi} + 1148,8, R^2 = 0,9924$
30	$T_{\phi} = 4,3906x_{\phi}^2 - 146,35x_{\phi} + 1127,3, R^2 = 0,9915$	$T_{\phi} = 1,1677x_{\phi}^2 - 76,096x_{\phi} + 931,6, R^2 = 0,8874$	$T_{\phi} = 1,2836x_{\phi}^2 - 82,98x_{\phi} + 992,24, R^2 = 0,8983$
60	$T_{\phi} = 3,129x_{\phi}^2 - 118,01x_{\phi} + 1114,2, R^2 = 0,9972$	$T_{\phi} = 1,1345x_{\phi}^2 - 76,363x_{\phi} + 1019,9, R^2 = 0,9491$	$T_{\phi} = 1,1761x_{\phi}^2 - 78,834x_{\phi} + 1041,7, R^2 = 0,9569$
90	$T_{\phi} = 2,0951x_{\phi}^2 - 94,131x_{\phi} + 1101,1, R^2 = 0,9959$	$T_{\phi} = 1,0487x_{\phi}^2 - 73,099x_{\phi} + 1063,5, R^2 = 0,9818$	$T_{\phi} = 1,0568x_{\phi}^2 - 73,579x_{\phi} + 1067,7, R^2 = 0,9848$
120	$T_{\phi} = 1,3609x_{\phi}^2 - 76,893x_{\phi} + 1102,3, R^2 = 0,9965$	$T_{\phi} = 0,9609x_{\phi}^2 - 69,501x_{\phi} + 1097,3, R^2 = 0,9953$	$T_{\phi} = 0,9532x_{\phi}^2 - 69,039x_{\phi} + 1093,3, R^2 = 0,9959$
150	$T_{\phi} = 0,8639x_{\phi}^2 - 64,1x_{\phi} + 1097,8, R^2 = 0,9981$	$T_{\phi} = 0,8597x_{\phi}^2 - 64,73x_{\phi} + 1108, R^2 = 0,9991$	$T_{\phi} = 0,8474x_{\phi}^2 - 63,997x_{\phi} + 1101,5, R^2 = 0,999$
180	$T_{\phi} = 0,5552x_{\phi}^2 - 54,975x_{\phi} + 1089, R^2 = 0,9996$	$T_{\phi} = 0,758x_{\phi}^2 - 59,617x_{\phi} + 1104,5, R^2 = 0,9995$	$T_{\phi} = 0,747x_{\phi}^2 - 58,967x_{\phi} + 1098,8, R^2 = 0,9993$
210	$T_{\phi} = 0,21x_{\phi}^2 - 43,663x_{\phi} + 1047,9, R^2 = 0,9997$	$T_{\phi} = 0,6428x_{\phi}^2 - 53,372x_{\phi} + 1078,3, R^2 = 0,998$	$T_{\phi} = 0,6242x_{\phi}^2 - 52,268x_{\phi} + 1068,6, R^2 = 0,9975$
240	$T_{\phi} = 0,5106x_{\phi}^2 - 45,969x_{\phi} + 1040,6, R^2 = 0,9932$	$T_{\phi} = 0,5245x_{\phi}^2 - 46,781x_{\phi} + 1047,2, R^2 = 0,9956$	$T_{\phi} = 0,5011x_{\phi}^2 - 45,392x_{\phi} + 1035, R^2 = 0,9946$
270	$T_{\phi} = 0,4351x_{\phi}^2 - 41,674x_{\phi} + 1017,8, R^2 = 0,9908$	$T_{\phi} = 0,4513x_{\phi}^2 - 42,621x_{\phi} + 1025,6, R^2 = 0,994$	$T_{\phi} = 0,4252x_{\phi}^2 - 41,072x_{\phi} + 1012, R^2 = 0,9927$
300	$T_{\phi} = 0,3769x_{\phi}^2 - 38,008x_{\phi} + 993,7, R^2 = 0,9889$	$T_{\phi} = 0,3942x_{\phi}^2 - 39,024x_{\phi} + 1002,3, R^2 = 0,9926$	$T_{\phi} = 0,3675x_{\phi}^2 - 37,443x_{\phi} + 988,37, R^2 = 0,9911$
330	$T_{\phi} = 0,3193x_{\phi}^2 - 34,371x_{\phi} + 965,53, R^2 = 0,987$	$T_{\phi} = 0,3364x_{\phi}^2 - 35,374x_{\phi} + 973,96, R^2 = 0,9913$	$T_{\phi} = 0,3097x_{\phi}^2 - 33,789x_{\phi} + 960, R^2 = 0,9896$
360	$T_{\phi} = 0,2786x_{\phi}^2 - 31,581x_{\phi} + 940,17, R^2 = 0,9871$	$T_{\phi} = 0,2912x_{\phi}^2 - 32,308x_{\phi} + 945,86, R^2 = 0,9907$	$T_{\phi} = 0,2689x_{\phi}^2 - 30,982x_{\phi} + 934,19, R^2 = 0,9896$
390	$T_{\phi} = 0,2305x_{\phi}^2 - 28,561x_{\phi} + 916,46, R^2 = 0,9852$	$T_{\phi} = 0,2912x_{\phi}^2 - 32,308x_{\phi} + 945,86, R^2 = 0,9907$	$T_{\phi} = 0,2197x_{\phi}^2 - 27,887x_{\phi} + 909,35, R^2 = 0,9882$

Таблица 3 – Полиномиальные уравнения аппроксимации зависимости  $T_{\phi}=f(x_{\phi})$

Время $t, c$	Уравнения аппроксимации
10	$T_{\phi} = 0,0151x_{\phi}^4 - 1,3424x_{\phi}^3 + 36,145x_{\phi}^2 - 359,22x_{\phi} + 1186,8, R^2 = 0,9939$
20	$T_{\phi} = -0,0002x_{\phi}^6 + 0,0195x_{\phi}^5 - 0,5754x_{\phi}^4 + 6,3309x_{\phi}^3 - 11,976x_{\phi}^2 - 219,4x_{\phi} + 1169,5, R^2 = 0,9996$
30	$T_{\phi} = 0,0009x_{\phi}^5 - 0,0761x_{\phi}^4 + 1,8841x_{\phi}^3 - 10,99x_{\phi}^2 - 113,68x_{\phi} + 1116,4, R^2 = 0,9999$
60	$T_{\phi} = 0,0006x_{\phi}^5 - 0,0556x_{\phi}^4 + 1,5987x_{\phi}^3 - 14,414x_{\phi}^2 - 50,363x_{\phi} + 1067,3, R^2 = 0,9999$
90	$T_{\phi} = 0,0003x_{\phi}^5 - 0,0288x_{\phi}^4 + 0,9262x_{\phi}^3 - 9,7653x_{\phi}^2 - 39,889x_{\phi} + 1059,7, R^2 = 1$
120	$T_{\phi} = 0,00009x_{\phi}^5 - 0,011x_{\phi}^4 + 0,432x_{\phi}^3 - 5,3548x_{\phi}^2 - 41,091x_{\phi} + 1073,1, R^2 = 1$
150	$T_{\phi} = -0,0017x_{\phi}^4 + 0,1407x_{\phi}^3 - 2,2717x_{\phi}^2 - 43,77x_{\phi} + 1078,3, R^2 = 1$
180	$T_{\phi} = -0,0006x_{\phi}^5 + 0,053x_{\phi}^4 - 0,6868x_{\phi}^3 - 46,624x_{\phi} + 1080, R^2 = 1$
210	$T_{\phi} = 0,00008x_{\phi}^5 - 0,0072x_{\phi}^4 + 0,2167x_{\phi}^3 - 2,4307x_{\phi}^2 - 32,065x_{\phi} + 1039,2, R^2 = 1$
240	$T_{\phi} = -0,0003x_{\phi}^5 + 0,0365x_{\phi}^4 - 1,0384x_{\phi}^3 - 26,925x_{\phi} + 1002, R^2 = 1$
270	$T_{\phi} = 0,00009x_{\phi}^5 - 0,0077x_{\phi}^4 + 0,2291x_{\phi}^3 - 2,9521x_{\phi}^2 - 15,94x_{\phi} + 972,32, R^2 = 1$
300	$T_{\phi} = 0,0002x_{\phi}^5 - 0,0194x_{\phi}^4 + 0,5274x_{\phi}^3 - 5,7017x_{\phi}^2 - 4,3481x_{\phi} + 942,7, R^2 = 1$
330	$T_{\phi} = 0,0003x_{\phi}^5 - 0,0228x_{\phi}^4 + 0,6102x_{\phi}^3 - 6,457x_{\phi}^2 + 1,2065x_{\phi} + 912,82, R^2 = 1$
360	$T_{\phi} = 0,0003x_{\phi}^5 - 0,0255x_{\phi}^4 + 0,6575x_{\phi}^3 - 6,4889x_{\phi}^2 + 0,834x_{\phi} + 892,35, R^2 = 1$
390	$T_{\phi} = 0,0181x_{\phi}^3 - 1,0351x_{\phi}^2 - 9,5607x_{\phi} + 871,66, R^2 = 0,9981$

### Выводы.

1. Предложенный метод математического описания позволяет:

– определить по малому числу измеренных величин  $T_{\phi}$  необходимого количества интерполяционных значений  $T_{\phi}$  при любых  $x_{\phi}$  и  $t$ ;

– рассчитать температуру поверхности  $T_{\phi}^n$  формы при отсутствии ее измеренных значений путем использования математического описания полиномами 3–6 степени зависимости  $T_{\phi} = f(x_{\phi})$ ;

– создать графики зависимостей  $T_{\phi} = f(x_{\phi})$  и  $T_{\phi} = f(t)$  при любых  $x_{\phi}$  и  $t$ , соответствующих условиям эксперимента (в т. ч. за пределами  $x_{\phi_{\max}}$  и  $t_{\text{затв}}$ );

– определять кроме  $T_{\phi}$ ,  $x_{\phi}$ ,  $x_{\phi_{\max}}$ ,  $t$ ,  $t_{\text{затв}}$ ,  $n_{\phi}$ ,  $T_{\phi}^n$ ,  $T_{\text{отл}}^n$ , еще и  $T_{\text{нсл}}$ , скорость прогрева и градиент температуры;

– реализовать его на ЭВМ с малой трудоемкостью при создании соответствующей программы;

– накопить массив данных для создания адекватной аналитической математической модели.

2. Квадратные уравнения неприемлемы для вычисления температуры  $T_{\phi}^n$ , но позволяют оценить другие параметры прогрева с удовлетворительной для практики точностью.

3. Применение величин теплоаккумуляции эффективной  $b_{\text{эф}}$  и локальной  $b_{\phi}$  дает одинаковые значения  $T_{\text{отл}}^n$ , что подтверждает правильность формулы (1).

### Список литературы

1. Левшин Г. Е., Павлюк К. И. К определению термофизических характеристик материала разовой формы // Заготовительные производства в машиностроении, 2009. – № 7. – С. 10 – 16.

2. Левшин Г. Е., Павлюк К. И. О термофизических характеристиках магнитомягких формовочных материалов и магнитных форм // Заготовительные производства в машиностроении, 2010. – № 7. – С. 7 – 11.

3. Левшин Г. Е., Павлюк К. И. О математическом моделировании прогрева литейной разовой объемной формы // Заготовительные производства в машиностроении, 2011. – № 11. – С. 6 – 9.

4. Левшин Г. Е. Проблемы математического моделирования прогрева разовой объемной формы // Ползуновский альманах, 2011. – № 4. – С. 26 – 28.

5. Левшин Г. Е., Матюшков И. Л. Литье в магнитные формы: монография. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. – 688 с.

6. Вейник А. И. Термодинамика литейной формы. – М.: Машиностроение, 1968. – 335 с.

7. Левшин Г. Е., Карих А. А. Математическое описание прогрева литейной магнитной формы в функции времени // Заготовительные производства в машиностроении, 2012. – № 7. – С. 8 – 14.

8. Левшин Г. Е., Карих А. А. Прогрев литейной магнитной формы в функции времени и расстояния от отливки // Заготовительные производства в машиностроении, 2013. – № 5. – С. 6 – 11.