

Анализ тепловых потерь рельса в окружающую среду на основе метеорологических наблюдений.

Аннотация

В статье приведены результаты исследования по оценке основных параметров процесса теплопотерь железнодорожных рельсов в окружающую среду. Показано, что тепловой баланс рельса определяется сочетанием радиационного излучения и конвективного теплообмена. Для анализа была принята математическая модель формирования разности температур рельса и воздуха, основой которой является уравнение теплового баланса рельса. Особое внимание уделено оценке коэффициентов теплопроводности процессов конвективного теплообмена, для чего были использованы результаты натурных измерений температур рельсов и основных параметров погоды автономной метеостанцией. Проведена апробация модели на основе данных автономной метеостанции, расположенной на севере Московской области. Результаты показывают, что предложенные зависимости позволяют адекватно описывать динамику изменения температуры рельсов и могут быть использованы для прогноза температурных воздействий в условиях эксплуатации бесстыкового пути.

Введение

Современные конструкции бесстыкового пути, применяемые в нашей стране и за рубежом, относятся к температурно-напряжённому типу, что обуславливает особые требования к их укладке и эксплуатации [1]. Продольные температурные силы, возникающие при изменении температуры рельсов, способны вызывать нарушение прочности рельсов либо потерю устойчивости пути. Особенно остро эта проблема проявляется в регионах с контрастным климатом (Сибирь, Дальний Восток), где амплитуда температурных воздействий значительно выше, чем в центральных районах России.

Ключевым параметром, определяющим уровень температурного воздействия, является температура рельсов. Действующая в РФ инструкция [1] по укладке и эксплуатации бесстыкового пути жёстко регламентирует выполнение работ по его укладке и обслуживанию в зависимости от температуры рельсов, что делает задачу её прогнозирования чрезвычайно актуальной.

Исторически контроль осуществлялся по результатам прямых измерений, которые ведутся на железных дорогах России с 1960-х годов. Однако традиционные методы характеризуются высокой трудоёмкостью и ограниченной надёжностью данных. С 2010 года внедряется система контроля бесстыкового пути (СКБП), обеспечивающая более точную регистрацию температур рельсов, но её географическое покрытие и временные ряды пока ограничены.

Альтернативой прямым измерениям выступает моделирование температуры рельсов на основе метеорологических характеристик – температуры воздуха, облачности, влажности и скорости ветра, которые составляют основу архивов погодных наблюдений и метеопрогнозов [2]. Указанные параметры определяют тепловой баланс рельса, формируемый процессами теплопоступления и теплоотдачи, для анализа которых использованы данные автономной метеостанции расположенной на севере Московской области [3]. Метеостанция выполняет учет более 20 различных метеорологических характеристик, включая также и температуру рельсов. Измерения ведутся в автоматическом режиме непрерывно с 2015 года с интервалом 10 минут. Результаты измерений сохраняются в текстовом файле, фрагмент которого приведен на рисунке 1.

1. Теоретические основы теплового баланса рельсов

Температура рельсов связана с температурой воздуха известной зависимостью [4]

$$t_p = t_e + \Delta t_{p-e} \quad (1)$$

где t_e – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

t_p – температура рельса, $^{\circ}\text{C}$;

Δt_{p-e} – величина разности температур рельса и воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

Температура воздуха t_e определяется по данным архивов погодных условий, или по метеопрогнозу, а величина Δt_{p-e} на основе уравнения теплового баланса, предложенное профессором С. П. Першиным [5]. В количествах теплоты оно записывается в виде

$$[Q(t) - F(t)]dt = C_{cm}Gd(\Delta t_{p-e}) \quad (2)$$

где $Q(t)$ – функция прихода тепла на один погонный метр рельса, ккал/ч;

$F(t)$ – функция потерь тепла с одного погонного метра рельса, ккал/ч;

C_{cm} – теплоемкость рельсовой стали, $C_{cm}=0,115$ ккал/(кг $^{\circ}\text{C}$);

G – погонный вес рельса, кг;

t – время, ч.

Количество тепла, поступающего к рельсу $Q(t)$ определяется уровнем солнечной радиации, степенью прозрачности атмосферы и облачностью. Методика оценки данных параметров по метеоданным приведена в [2, 6] и основана на формулах астрономии и сферической геометрии.

Потери тепла рельсом в окружающую среду $F(t)$ представляют собой достаточно сложный процесс, который происходит за счёт:

- **радиационного теплообмена**, определяемого законом Стефана–Больцмана и зависящего от температуры поверхности рельса, степени его черноты и встречного излучения атмосферы [6];

Date	Time	Temp	Hi	Low	Out	Dew	Wind	Wind	Wind	Hi	Wind	Heat	THW	THSW	Rain	Solar	Solar	Hi	Solar	Heat	Cool	In	In	In	In	In	Soil	Soil	Soil	Soil				
		Out	Temp	Temp	Hum	Pt.	Speed	Dir	Run	Speed	Dir	Chill	Index	Index	Bar	Rain	Rate	Rad.	Energy	Rad.	D-D	D-D	Temp	Hum	Temp	Air	EMC	Temp 1	Temp 2	Temp 3	Temp 4			
17.07.24	12:00	26.8	26.8	26.6	59	18.1	0.9	ENE	0.54	3.1	E	26.8	27.4	27.4	33.8	763.1	0.00	0.0	737	10.57	745	0.000	0.059	27.2	51	16.2	27.4	9.33	1.1596	0.48	41.1	38.3	45.0	45.0
17.07.24	12:10	27.1	27.1	26.8	56	17.6	0.4	NNE	0.27	1.3	NNE	27.1	27.7	27.7	34.1	763.1	0.00	0.0	744	10.67	745	0.000	0.061	27.2	51	16.2	27.4	9.33	1.1595	0.00	41.7	38.9	46.1	45.6
17.07.24	12:20	26.7	27.2	26.7	55	16.9	1.3	ENE	0.80	3.6	ENE	26.7	27.1	27.1	33.4	763.0	0.00	0.0	744	10.67	747	0.000	0.058	27.2	51	16.2	27.4	9.33	1.1591	0.00	41.1	38.3	45.0	45.0
17.07.24	12:30	27.1	27.1	26.7	58	18.1	0.9	ENE	0.54	1.8	NW	27.1	27.8	27.8	34.2	762.9	0.00	0.0	746	10.69	749	0.000	0.061	27.3	51	16.3	27.6	9.33	1.1586	0.00	41.7	39.4	46.7	46.1
17.07.24	12:40	27.4	27.4	27.1	55	17.6	0.9	WNW	0.54	1.8	NNE	27.4	28.1	28.1	34.4	763.0	0.00	0.0	745	10.68	747	0.000	0.063	27.3	51	16.3	27.6	9.33	1.1587	0.00	41.7	39.4	46.7	46.1
17.07.24	12:50	27.8	27.8	27.4	54	17.6	0.4	NNE	0.27	1.3	NNE	27.8	28.4	28.4	34.8	762.9	0.00	0.0	745	10.68	749	0.000	0.066	27.3	51	16.3	27.6	9.33	1.1583	0.00	42.2	40.0	47.8	47.2
17.07.24	13:00	27.9	27.9	27.8	54	17.7	0.9	NW	0.54	1.8	NW	27.9	28.6	28.6	34.9	762.9	0.00	0.0	747	10.71	749	0.000	0.066	27.3	51	16.3	27.6	9.33	1.1584	0.51	42.8	40.0	48.3	47.8
17.07.24	13:10	28.1	28.1	27.9	51	17.0	0.4	NE	0.27	2.2	ENE	28.1	28.6	28.6	34.9	762.9	0.00	0.0	750	10.75	751	0.000	0.068	27.4	51	16.4	27.7	9.32	1.1581	0.00	42.8	40.6	48.3	47.8
17.07.24	13:20	28.2	28.2	28.1	53	17.7	0.4	NE	0.27	1.3	NE	28.2	28.9	28.9	35.2	762.8	0.00	0.0	747	10.71	751	0.000	0.068	27.4	51	16.4	27.8	9.32	1.1576	0.00	42.8	40.6	48.9	47.8
17.07.24	13:30	28.2	28.2	28.2	51	17.1	0.4	N	0.27	1.3	N	28.2	28.7	28.7	34.9	762.8	0.00	0.0	737	10.57	740	0.000	0.068	27.5	50	16.1	27.7	9.12	1.1578	0.00	42.8	40.6	48.3	47.8
17.07.24	13:40	28.2	28.2	28.3	49	16.4	0.9	N	0.54	3.1	E	28.2	28.4	28.4	34.7	762.8	0.00	0.0	735	10.54	740	0.000	0.068	27.5	50	16.1	27.7	9.12	1.1577	0.00	42.8	40.6	48.3	47.8
17.07.24	13:50	27.7	27.7	28.2	50	16.3	1.3	ENE	0.80	2.7	ESE	27.7	27.9	27.9	34.2	762.6	0.00	0.0	726	10.41	729	0.000	0.065	27.6	50	16.2	27.9	9.12	1.1569	0.00	43.3	41.1	47.2	46.7
17.07.24	14:00	27.6	27.6	27.7	51	16.6	0.9	NNE	0.54	2.2	NNE	27.6	27.9	27.9	34.2	762.5	0.00	0.0	720	10.32	722	0.000	0.064	27.7	49	16.0	27.9	8.91	1.1569	0.51	42.8	40.6	46.7	46.7
17.07.24	14:10	28.1	28.1	27.6	52	17.3	0.4	N	0.27	1.3	N	28.1	28.6	28.6	34.9	762.5	0.00	0.0	712	10.21	715	0.000	0.068	27.7	49	16.0	27.9	8.91	1.1569	0.00	43.3	41.1	47.8	47.2
17.07.24	14:20	28.1	28.2	28.1	49	16.4	0.9	N	0.54	3.1	E	28.1	28.4	28.4	34.6	762.4	0.00	0.0	704	10.09	708	0.000	0.068	27.8	49	16.1	28.0	8.91	1.1561	0.00	43.9	41.7	47.2	46.7
17.07.24	14:30	28.3	28.3	28.1	51	17.2	0.9	NNE	0.54	2.2	ENE	28.3	28.8	28.8	35.1	762.4	0.00	0.0	692	9.92	696	0.000	0.069	27.8	49	16.1	28.0	8.91	1.1562	0.00	43.9	42.2	47.2	46.7
17.07.24	14:40	28.3	28.3	28.2	49	16.6	0.9	ENE	0.54	3.1	E	28.3	28.7	28.7	34.8	762.3	0.00	0.0	679	9.73	684	0.000	0.069	27.8	49	16.1	28.0	8.91	1.1563	0.00	43.9	42.2	46.7	46.1
17.07.24	14:50	28.6	28.6	28.3	49	16.8	0.4	NNE	0.27	1.8	NNE	28.6	29.0	29.0	35.2	762.3	0.00	0.0	671	9.62	675	0.000	0.071	27.8	48	15.8	28.0	8.81	1.1561	0.00	45.0	42.8	47.2	46.7
17.07.24	15:00	29.1	29.1	28.6	47	16.6	0.4	NNE	0.27	0.9	NNW	29.1	29.4	29.4	35.6	762.3	0.00	0.0	661	9.48	666	0.000	0.074	27.9	48	15.9	28.1	8.81	1.1558	0.48	45.6	43.9	47.8	46.7
17.07.24	15:10	29.6	29.6	29.1	47	17.1	0.4	NNE	0.27	1.3	NNW	29.6	30.1	30.1	36.2	762.2	0.00	0.0	651	9.33	654	0.000	0.078	27.9	49	16.2	28.2	8.80	1.1551	0.00	46.7	44.4	47.8	47.2
17.07.24	15:20	29.3	29.3	29.3	49	17.5	0.4	W	0.27	1.3	W	29.3	30.1	30.1	36.2	762.2	0.00	0.0	635	9.10	647	0.000	0.076	28.0	49	16.3	28.3	8.80	1.1547	0.00	46.1	44.4	47.2	46.7
17.07.24	15:30	28.9	29.3	28.9	52	18.1	0.4	S	0.27	1.8	S	28.9	29.9	29.9	36.1	762.2	0.00	0.0	620	8.89	626	0.000	0.074	28.0	49	16.3	28.3	8.80	1.1547	0.00	46.1	44.4	46.1	45.6
17.07.24	15:40	28.8	29.0	28.8	50	17.3	0.9	S	0.54	1.8	NE	28.8	29.4	29.4	35.5	762.1	0.00	0.0	596	8.54	622	0.000	0.073	28.1	48	16.0	28.2	8.80	1.1547	0.00	46.1	44.4	45.6	45.6
17.07.24	15:50	28.7	28.7	28.7	49	16.9	0.9	NE	0.54	1.3	NNE	28.7	29.1	29.1	35.2	762.0	0.00	0.0	570	8.17	589	0.000	0.072	28.1	48	16.0	28.2	8.80	1.1546	0.00	46.1	44.4	45.0	44.4
17.07.24	16:00	28.4	28.7	28.3	52	17.6	0.9	ENE	0.54	1.8	NNE	28.4	29.1	29.1	35.1	761.9	0.00	0.0	558	8.00	578	0.000	0.070	28.1	48	16.1	28.3	8.80	1.1542	0.43	46.1	44.3	43.9	43.9
17.07.24	16:10	28.3	28.5	28.3	50	16.9	0.4	ENE	0.27	2.7	ENE	28.3	28.7	28.7	34.7	761.8	0.00	0.0	551	7.90	563	0.000	0.069	28.2	49	16.4	28.4	8.80	1.1533	0.00	45.6	43.3	43.3	42.8
17.07.24	16:20	27.8	28.3	27.8	51	16.8	1.3	ENE	0.80	2.7	ENE	27.8	28.3	28.3	34.2	761.7	0.00	0.0	529	7.58	545	0.000	0.066	28.2	48	16.1	28.4	8.80	1.1535	0.00	45.0	42.8	41.7	47.2
17.07.24	16:30	27.8	27.9	27.8	50	16.4	0.9	ENE	0.54	2.2	ENE	27.8	28.1	28.1	34.0	761.7	0.00	0.0	512	7.34	524	0.000	0.066	28.2	48	16.2	28.4	8.79	1.1533	0.00	44.4	42.8	40.6	40.6
17.07.24	16:40	28.0	28.0	27.8	51	16.9	0.9	NNE	0.54	2.7	E	28.0	28.4	28.4	34.3	761.7	0.00	0.0	494	7.08	503	0.000	0.067	28.3	48	16.2	28.5	8.79	1.1530	0.00	44.4	42.2	40.0	39.4
17.07.24	16:50	28.4	28.4	28.0	53	17.9	0.4	NNE	0.27	1.3	NNW	28.4	29.3	29.3	35.2	761.7	0.00	0.0	473	6.78	483	0.000	0.070	28.3	48	16.2	28.5	8.79	1.1530	0.00	44.4	41.7	40.0	38.9
17.07.24	17:00	28.9	28.9	28.4	48	16.8	0.4	NNE	0.27	1.3	NNW	28.9	29.4	29.4	35.1	761.6	0.00	0.0	450	6.45	461	0.000	0.074	28.3	48	16.2	28.5	8.79	1.1528	0.36	44.4	42.2	39.4	39.4
17.07.24	17:10	28.4	29.0	28.4	48	16.4	0.9	NNE	0.54	1.8	NNE	28.4	28.7	28.7	34.3	761.6	0.00	0.0	426	6.11	438	0.000	0.070	28.3	48	16.3	28.6	8.79	1.1526	0.00	42.8	41.1	37.8	37.8
17.07.24	17:20	28.2	28.4	28.2	49	16.5	0.9	NE	0.54	1.8	NE	28.2	28.6	28.6	34.0	761.5	0.00	0.0	404	5.79	415	0.000	0.069	28.3	48	16.3	28.6	8.79	1.1523	0.00	42.8	40.6	37.2	36.7
17.07.24	17:30	28.3	28.2	28.2	49	16.5	0.4	NE	0.27	1.3	NE	28.3	28.6	28.6	33.9	761.5	0.00	0.0	382	5.48	392	0.000	0.069	28.4	48	16.3	28.6	8.79	1.1521	0.00	42.2	40.0	37.2	36.7
17.07.24	17:40	28.6	28.6	28.3	49	17.1	0.0	---	0.00	0.0	---	28.6	29.3	29.3	34.6	761.5	0.00	0.0	360	5.16	369	0.000	0.073	28.4	48	16.3	28.6	8.79	1.1521	0.00	42.8	40.6	37.2	36.7
17.07.24	17:50	28.2	28.8	28.2	49	16.5	0.4	NE	0.27	2.2	NE	28.2	28.6	28.6	33.4	761.3	0.00	0.0	320	4.59	352	0.000	0.069	28.4	48	16.4	28.7	8.79	1.1516	0.00	41.7	39.4	36.1	35.6
17.07.24	18:00	27.3	28.2	27.3	50	16.																												

Рисунок 1 – Общий вид архива метеорологических параметров, измеренных автономной метеостанцией

17 июля 2024 года.

- **конвективного теплообмена**, который зависит от температуры окружающей среды, влажности, скорости ветрового потока.

В этом случае, пользуясь законом охлаждения Ньютона–Рихмана, данный процесс можно представить следующим уравнением:

$$F(\tau) = f(\tau) \Delta t_{p-e} = (\alpha_k k S_k + \alpha_u S_u) \Delta t_{p-e} \quad (3)$$

где α_k и α_u - коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением, ккал/(м² ч °C);

S_k и S_u - площади поверхностей рельса на длине 1-го погонного метра, на которых происходит теплоотдача конвекцией и излучением, м².

В основе процесса радиационного теплообмена лежит закон Стефана–Больцмана, согласно которому интенсивность излучения пропорциональна четвёртой степени абсолютной температуры поверхности. Однако в практических условиях учитывается не только собственное излучение рельса, но и встречное излучение атмосферы. Поэтому результирующий тепловой поток определяется разностью четвёртых степеней температур поверхности рельса и воздуха [7]:

$$\alpha_u = \varepsilon c_0 \left[\left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_e}{100} \right)^4 \right] \approx 0,04 \varepsilon c_0 \left(\frac{T_m}{100} \right)^3 \quad (4)$$

где ε - приведенная степень черноты железнодорожных рельсов, $\varepsilon \approx 0,77$; c_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела, $c_0 = 5,67 \text{ Bm}/(\text{m}^2 \cdot \text{°K}^4)$ или $c_0 = 4,88 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°K}^4)$;

$T_m = (T_p + T_e)/2$ - средняя температура рельса и воздуха, К.

Отметим высокое значение приведенной степени черноты железнодорожных рельсов ($\varepsilon \approx 0,77$). Это обстоятельство делает радиационный теплообмен значимым даже при сравнительно небольших температурных перепадах между рельсом и воздухом. Сезонные и суточные изменения температуры существенно влияют на интенсивность излучения.

Конвекция является одним из основных механизмов теплообмена между поверхностью рельса и окружающим воздухом. Он может быть как естественным (вызванным разностью плотностей воздуха при нагреве), так и вынужденным - при наличии ветра.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k обычно определяются на основе экспериментальных исследований. С железнодорожным рельсом такие исследования не проводились. В таких случаях для описания процессов конвекции используются безразмерные критерии Рейнольдса (Re), Прандтля (Pr), Грасгофа (Gr), Нуссельта (Nu) и соответствующие эмпирические зависимости, определяемые формой твердого тела, находящегося в условиях конвективного теплообмена [7, 9, 10].

Для оценки коэффициента α_k применяется критерий Nu

$$\alpha_k = Nu \cdot \lambda / L \quad (5)$$

где λ - коэффициент теплопроводности воздуха, ккал/ (м ч °C);
 L - характерный размер, м.

Число Нуссельта может быть рассчитано по обобщённой зависимости [8, 9]

$$Nu = C \cdot Ra^m \cdot Pr^n \quad (6)$$

где значения коэффициентов C и n зависят от формы обтекаемого воздушным потоком тела, температурного фактора и степени турбулентности потока, а показатель степени n лежит в пределах 0,3–0,4.

В первом приближении железнодорожный рельс можно представить в виде горизонтального цилиндра диаметром $D=L \approx 0,161$ м [5]. В этом случае можно принять [8]:

для ламинарного режима ($Ra < 1 \cdot 10^4$: $C \approx 0,683$, $m \approx 0,466$, $n \approx 0,35$);
для турбулентного режима ($Ra > 1 \cdot 10^4$: $C \approx 0,027$, $m \approx 0,805$, $n \approx 0,35$).

Число Рейнольдса определяется формулой [7]

$$Re = uL/v \quad (7)$$

где u - скорость потока, м/с;

v - кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

При скоростях воздушного потока $u < 1$ м/с процесс конвективной теплоотдачи происходит за счет естественной конвекции. В этом случае

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n \quad (8)$$

Для практических расчетов коэффициенты C и n принимают следующие значения [8]

для ламинарного режима ($5 \cdot 10^2 < Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7$: $C \approx 0,54$, $n \approx 1/4$);

для турбулентного режима ($Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^7$: $C \approx 0,135$, $n \approx 1/3$).

Геометрическая форма железнодорожного рельса далека от формы цилиндра, для которой справедливы вышеупомянутые зависимости. Естественно предположить, что для рельса параметр C , входящий в формулы (6, 8) и m в формуле (6) будет отличаться от приведенных, что и подтвердилось при анализе расчетных данных, полученных по вышеупомянутым формулам на основе реальных замеров.

2. Исследование параметров конвективного теплообмена для рельса

Исследование проводилось с целью уточнения коэффициентов конвективного теплообмена для железнодорожного рельса α_k . Для анализа (см. рисунок 1) были использованы данные реальных замеров основных метеопараметров на автономной метеостанции, включая температуры рельсов. Измеренные температуры рельсов сравнивались с расчетными, которые рассчитывались по зависимости (1). Разница температур рельса и воздуха Δt_{p-e} при этом определялась по уравнению

$$\frac{d}{d\tau} \Delta t_{p-e} + \frac{f(\tau)}{C_{cm}G} \Delta t_{p-e} = \frac{Q(\tau)}{C_{cm}G} \quad (9)$$

Уравнение получено в результате преобразования уравнения теплового баланса (2) с учетом зависимости (3) и представляет собой линейное дифференциальное уравнение первого порядка. Поскольку аналитическое решение получить затруднительно ввиду сложного вида функций $Q(\tau)$ и $F(\tau)=f(\tau)/C_{cm}G$, для его решения применялись численные методы.

Уравнение (9) ранее в ряде научных исследований использовалось для анализа изменения температуры рельсов в зависимости от температуры воздуха, уровня солнечной радиации и ветра [5]. Температура воздуха при этом задавалась постоянной, соответствующая середине дня при полном отсутствии облачности. Скорость ветра не превышала 5 м/с. Полученные результаты позволили выявить основные закономерности изменения разности температур рельса и воздуха Δt_{p-e} в зависимости от типа рельса, его азимута, географического положения, времени года и суток. Однако при решении данного уравнения в качестве исходных данных никогда не применялись реальные метеорологические наблюдения, а также не проводилась оценка точности вычислений путём сопоставления с результатами натурных измерений.

Прямые измерения метеопараметров в рамках данного исследования позволили с высокой точностью определить основные параметры уравнения (9). Благодаря наличию на метеостанции специализированного датчика солнечной радиации [2], тепловой поток $Q(\tau)$, поступающий к рельсу, был оценен непосредственно, что исключило необходимость в дополнительных измерениях прозрачности атмосферы и облачности.

Температуры воздуха и рельса, полученные в ходе измерений, использовались для расчёта коэффициента теплоотдачи излучением α_i по формуле (4). Далее, с учётом известных скоростей ветра, были определены критерии подобия Рейнольдса (Re) и Прандтля (Pr). Эти параметры легли в основу расчёта коэффициента теплоотдачи конвекцией α_k по формуле (5) с применением выражений (6), (7) и (8).

Параметры C и m в формулах (6, 8) уточнялись для железнодорожного рельса методом нелинейной оптимизации в среде MATLAB. В качестве критерия оптимизации использовалась минимизация средней абсолютной ошибки (MAE), рассчитываемой как:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |t_{\text{замер}} - t_{\text{расч}}|$$
(10)

где $t_{\text{замер}}$ – температура рельсов по замерам на метеостанции, $^{\circ}\text{C}$;
 $t_{\text{расч}}$ – расчетная температура рельсов по математической модели (9), $^{\circ}\text{C}$;
 n – количество измеренных значений, шт.

На начальном этапе оптимизации параметры C и m принимались равными значениям, приведённым выше в формулах (6) и (8). На их основе рассчитывались функции прихода тепла к рельсу $Q(\tau)$ и его потерь $F(\tau)$. Согласно уравнению (9), определялась разность температур рельса и воздуха $\Delta t_{\text{р-в}}$, а затем по формуле (1) вычислялась температура рельса. Оценивалась средняя абсолютная ошибка (MAE). Далее, в соответствии с заданными алгоритмами, происходила итеративная корректировка параметров до тех пор, пока значение MAE не достигало минимума.

Для оптимизации использовались метеорологические данные, охватывающие период с 2015 года, ограниченный месяцами с апреля по октябрь. Такой временной диапазон был выбран с целью исключения влияния снежного покрова на процессы теплообмена. Особое внимание уделялось интервалам с выраженной ветровой нагрузкой, оказывающей значительное влияние на тепловой режим.

В результате анализа расчетных данных для железнодорожных рельсов при скорости воздушного потока $u < 10 \text{ м/с}$ были установлены следующие значения коэффициентов в формуле (6):

для ламинарного режима ($Re < 1 \cdot 10^4$: $C \approx 0,718$, $m \approx 0,478$, $n \approx 0,3$);
для турбулентного режима ($Re > 1 \cdot 10^4$: $C \approx 0,034$, $m \approx 0,8$, $n \approx 0,4$).

Графическая зависимость коэффициентов теплоотдачи конвекцией (α_k) для железнодорожного рельса от температуры и скорости воздушного потока представлена на рисунке 2.

Для случая естественной конвекции ($u < 1 \text{ м/с}$) были приняты следующие значения коэффициентов:

для ламинарного режима ($5 \cdot 10^2 < Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7$: $C \approx 1,0$, $n \approx 1/4$);
для турбулентного режима ($Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^7$: $C \approx 0,17$, $n \approx 1/3$).

3. Экспериментальная проверка модели теплопотерь рельса

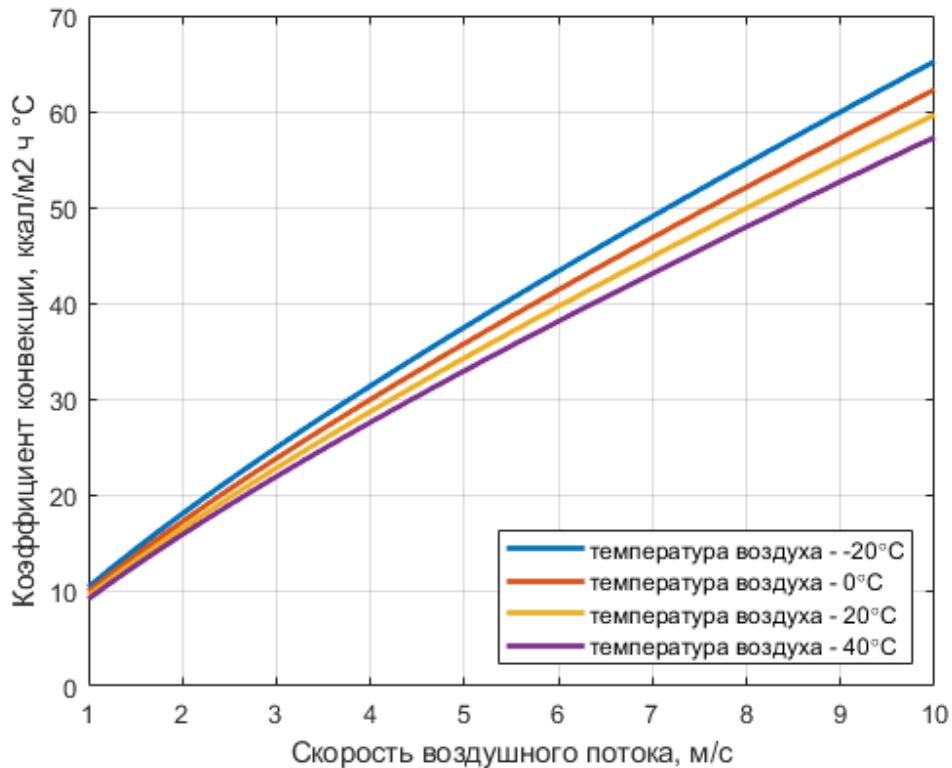


Рисунок 2 - Коэффициенты теплоотдачи конвекцией для железнодорожного рельса при его обтекании воздушным потоком, имеющим различную скорость и температуру

Точность расчёта температуры рельсов по формулам (1) и (9) с уточнёнными параметрами теплообмена оценивалась по критерию (10). Для этого были выбраны временные интервалы, охватывающие различные метеорологические условия, представленные в таблице 1. Особое внимание уделялось периодам жаркой погоды, поскольку именно они создают наибольшие риски нарушения температурного режима бесстыковых рельсовых плетей.

В Московском регионе подходящие условия наблюдались, в частности, в июне-июле 2021 года (с момента начала регистрации данных автономной метеостанцией в 2015 году). Были выделены два характерных периода с температурой воздуха выше 30 °С при практически полном штиле и при слабом ветре. Эти периоды отражены в строках № 1 и № 2 таблицы 1.

Сопоставление измеренных и расчётных температур рельса и воздуха для условий № 1 приведено на рисунке 3. Отмечается высокая сходимость расчётных значений температуры рельса с экспериментальными данными. Средняя абсолютная ошибка (МАЕ) не превышает 2 °С.

Схожая точность наблюдается и при других метеорологических условиях. В строке №3 таблицы 1 приведены результаты для типичных летних условий средней полосы России (малооблачная погода, слабый ветер, температура воздуха 15–25 °C). Соответствующие графики изменения температуры рельса и воздуха показаны на рисунке 4.

Таблица 1 – Погодные условия и периоды измерений, учитываемые при расчетах

№ п/п	Климатические параметры			Характер погодных условий	Период наблюдений	Количество измерений N*)	Ошибка MAE*, °C	Δt_{p-e}^{max} , °C замер/расчет
	Облачность	Скорость ветра, м/с	Температура воздуха, °C					
1	ясно (n=0)	<0,3	> 30	ясная, солнечная погода с температурой воздуха выше 30°C, штиль	20.06.2021 ÷ 24.06.2021	44	1,7	20,2 / 20,7
2	ясно (n=0)	1,0 ÷ 2,0	> 30	ясная, солнечная погода с температурой воздуха выше 30°C, слабый ветер с порывами до 5 м/с	13.07.2021 ÷ 16.07.2021	31	1,6	20,7 / 20,9
3	малооблачно (n ≈ 1 ÷ 3)	1,0 ÷ 2,0	15 ÷ 25	малооблачная погода с температурой воздуха 15–25°C, слабый ветер с порывами до 5 м/с	22.07.2024 ÷ 26.07.2024	78	1,7	19,2 / 18,3
4	переменная (n ≈ 4 ÷ 6)	2,0 ÷ 3,0	10 ÷ 20	переменная облачность с температурой воздуха 10–20°C, умеренный ветер с порывами до 7 м/с	03.05.2025 ÷ 07.05.2025	46	1,8	20,1 / 19,1
5	облачно с прояснениями (n ≈ 7 ÷ 9)	2,0 ÷ 3,0	5 ÷ 10	облачно с прояснениями с температурой воздуха 5–10°C, умеренный ветер с порывами до 9 м/с	09.11.2022 ÷ 13.11.2022	101	0,7	1,1 / 3,0

*) – количество измерений и ошибка определялись в интервале указанных климатических параметров

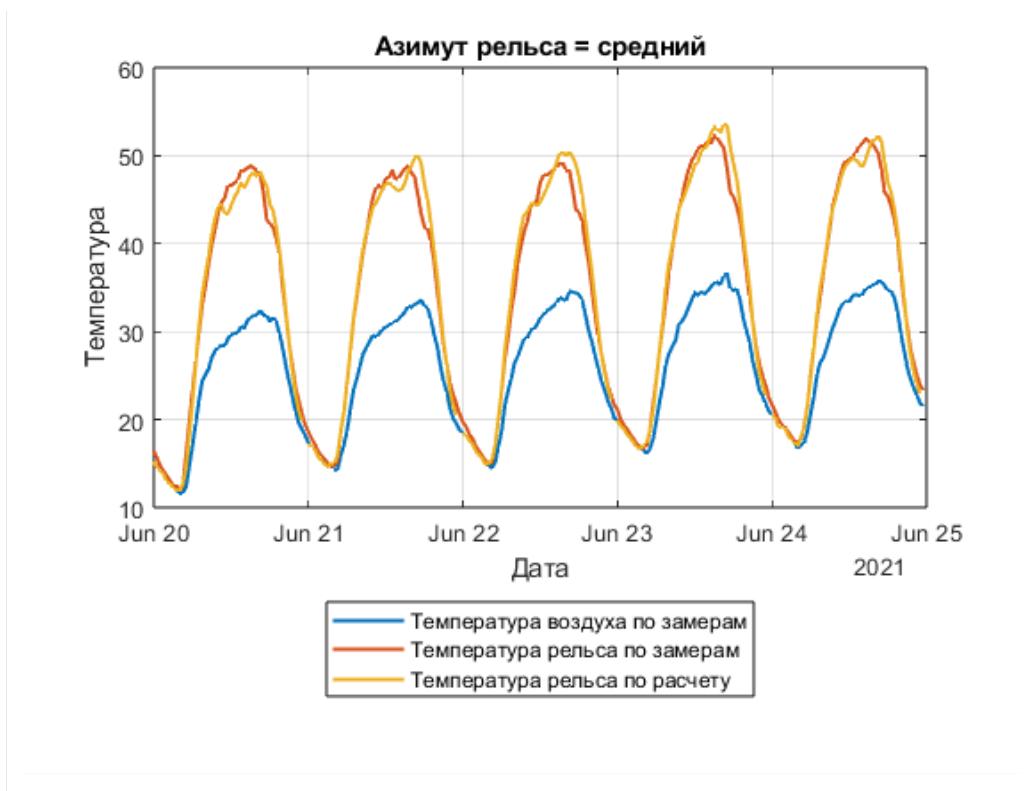
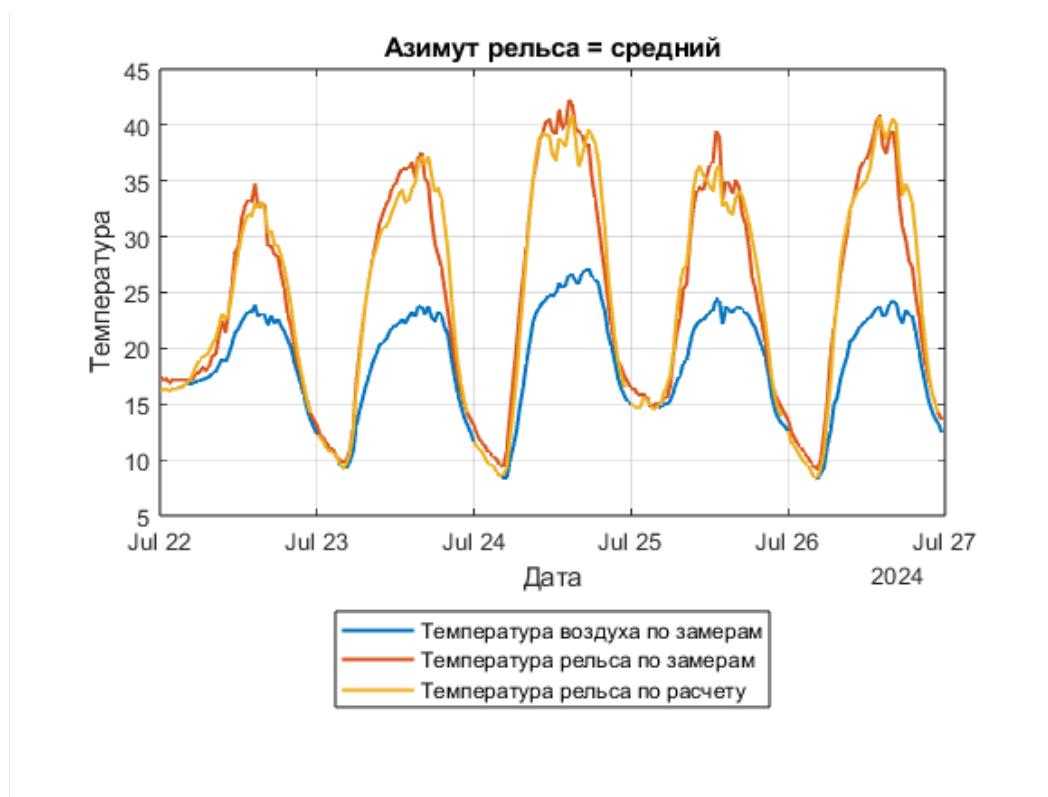


Рисунок 3 – Температуры воздуха и рельсов по замерам и расчету за период с 21 по 24 июня 2021 года (жаркая, безоблачная погода при практически полном отсутствии ветра)

Рисунок 4 – Температуры воздуха и рельсов по замерам и расчету за период с 22 по 26 июня 2025 года (малооблачная погода при слабом ветре)



Дополнительно были рассмотрены временные интервалы, соответствующие началу и завершению периода летних путевых работ (строки № 4 и № 5 таблицы 1). В этих случаях средняя ошибка также не превышала 2 °C.

Следует отметить, что весной и осенью погодные условия отличаются высокой изменчивостью. Наблюдаются резкие перепады температур, чередование периодов с интенсивной солнечной радиацией и адвекцией холодного воздуха, а также неустойчивый ветровой режим. Всё это вносит дополнительную неопределенность в тепловые расчёты.

В такие периоды расхождение между расчётными и измеренными температурами рельса в отдельных случаях может более чем вдвое превышать погрешность, характерную для стабильных условий. Это указывает на необходимость более детального изучения процессов теплообмена между железнодорожным рельсом и окружающей средой с целью уточнения математической модели.

В то же время следует подчеркнуть, что в эти сезоны температура рельсов, как правило, не достигает экстремально высоких значений, поэтому абсолютная ошибка обычно остаётся в пределах 2–4 °C.

Кроме того, влияние снежного покрова на формирование температурного поля рельсов в настоящее время исследовано недостаточно, что также требует проведения дополнительных наблюдений и расчётов.

Заключение

Проведённый анализ показал высокую степень сходимости расчётных температур рельса с результатами натурных измерений. Установлено, что на точность модели существенное влияние оказывает процесс теплопотерь в окружающую среду, при этом функция $F(\tau)$ адекватно описывает теплообмен рельса. Ключевую роль в формировании температурного режима играют радиационные и конвективные процессы.

Разработанная математическая модель учитывает как естественную, так и вынужденную конвекцию, а также радиационный теплообмен. Сопоставление расчётных данных с результатами наблюдений автономной метеостанции подтвердило её применимость для прогнозирования температур рельсов.

Полученные результаты открывают перспективы использования модели в системах мониторинга и управления состоянием бесстыкового пути, что имеет особое значение для регионов с экстремальными климатическими условиями.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 № 2544р.
2. Журавлев А. С. Оценка температуры рельсов на основе метеоданных. Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: XVIII Международная научно-техническая конференция (г. Москва, 27—28 октября 2021 г.) : чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца : труды / РЖД, РУТ (МИИТ). — М., 2021. С. 198–202.
3. Замуховский А.В., Манюгина Е.А., Журавлев А.С. Прогноз температурных воздействий на рельсы с помощью нейронных сетей. Путь и путевое хозяйство. 2020. №3. С. 26–29.
4. Бесстыковой путь. Альбрехт В.Г., Бромберг Е.М., Зверев Н.Б., Шульга В.Я. М: Транспорт, 1982 г.
5. Першин С. П. О разности температур рельса и воздуха. Вестник ВНИИЖТ. 1965. № 5. С. 13–17.
6. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Ленинград, Гидрометеоиздат, 1984. - 753 с.
7. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. – 345 с.
8. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. М.: Книга по Требованию, 2012. – 415 с.
9. Holman, J.P. *Heat Transfer*. 10th ed. - New York: McGraw-Hill, 2010.
10. John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, A Heat Transfer Textbook (Sixth Edition), 2024.