



ПГРК УРРАН, КАПС БП

Зам.директора НОУ ДПО
«ИНФОТРАНС»
А.А.Бондаренко



Выброс бесстыкового пути



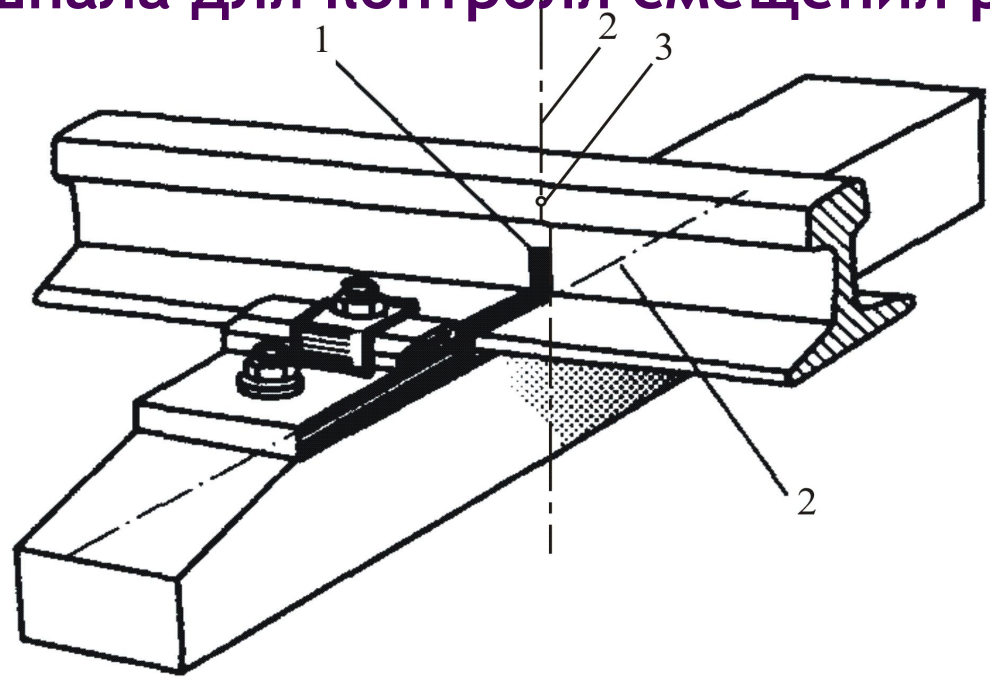
Выброс бесстыкового пути под поездом



Сход пассажирского поезда в результате потери устойчивости бесстыкового пути (Заб.жд)



«Маячная» шпала для контроля смещения рельсовой плиты

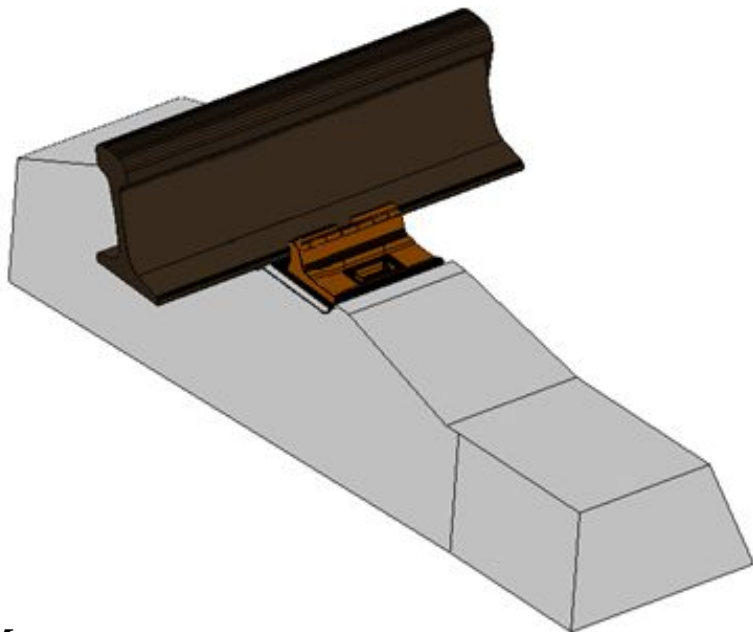


1 - риска; 2 - линии совмещения риски с кромкой подкладки; 3 - керн
 Перемещение плиты по ходу километров считается положительным, против хода – отрицательным. Анализ перемещений стометровых участков бесстыкового пути выполняют следующим образом – от значений перемещений относительно последующего створа (a_n) отнимают с учетом знака значение перемещения относительно предыдущего створа (a_{n-1}) по формуле

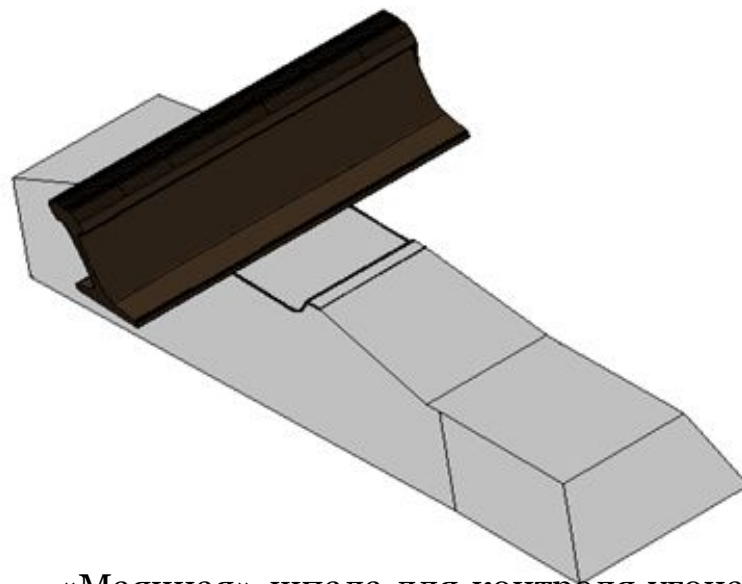
$$\Delta l = a_n - a_{n-1}$$

Выдержки из инструкции по устройству, укладке и содержанию бесстыкового пути Оборудование маячных шпал

Контроль за угоном плетей осуществляется по смещению контрольных сечений рельсовой плети относительно «маячных» шпал. Эти сечения отмечают поперечными полосами шириной 10 мм, наносимыми при помощи трафаретов несмываемой светлой (белой) краской: на подкладку, на верх подошвы и шейку рельсов внутри колеи в створе с боковой гранью подкладки подкладочных креплений КБ-65, ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65ПШ (рисунок 4.2), в створе с боковой гранью верхней площадки шпалы для бесподкладочных креплений ЖБР-65, ЖБР-65Ш, W-30 (рисунок 4.3), и в створе с боковой гранью головки анкера креплений АРС-4 и Pandrol-350. На участках с загрязнением рельсовых плетей внутри колеи разрешается наносить риски с наружной стороны колеи.



«Маячная» шпала для контроля угона пути для подкладочных креплений



«Маячная» шпала для контроля угона пути для бесподкладочных креплений

Выдержки из инструкции по устройству, укладке и содержанию бесстыкового пути

Нормы затяжки болтов и шурупов при укладке бесстыкового пути и допусжаемому понижению ее в процессе эксплуатации

При укладке бесстыкового пути каждый узел креплений должен обеспечивать нормативное прижатие рельса к основанию не менее 20 кН. Это достигается затяжкой болтов и шурупов промежуточных креплений крутящим моментом в соответствии с требованиями, приведенными в таблице.

Показатели	Крутящий момент, Н·м, при типах креплений				
	КБ-65		ЖБР-65	ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65ПШ	W-30
	клеммный болт	закладной болт			
Затяжка болтов и шурупов при укладке бесстыкового пути	150 ^{*)}	120 ^{*)}	200	250	350
Допускаемое понижение затяжки болтов и шурупов в процессе эксплуатации	100	70	120	150	200

Для обеспечения запаса усилия прижатия затяжку гаек болтов креплений КБ-65 при укладке плетей и при подтягивании их в процессе эксплуатации необходимо производить крутящим моментом: 200 Н·м (20 кгс·м) – для клеммных болтов; 150 Н·м (15 кгс·м) – для закладных болтов. Для других типов рельсовых креплений – по техническим условиям, утвержденным ЦП.

Монорегулятор креплений АРС-4 при укладке бесстыкового пути должен быть установлен на 3-ю позицию

Выдержки из инструкции по устройству, укладке и содержанию бесстыкового пути Определение промежуточной температуры закрепления или перезакрепления плетей

Если плети укладываются при температурах выше или ниже оптимальных $\pm 5^{\circ}\text{C}$, то следует принимать меры для введения плетей в оптимальную температуру закрепления в соответствии с требованиями п.п.4.6 и 4.7 настоящей Инструкции. Работы должны выполняться по утвержденным технологическим процессам.

Допускается временное закрепление плетей вне оптимальной температуры с последующим выполнением работ по введению плетей в оптимальную температуру.

Все вновь уложенные при отрицательных температурах плети до наступления температуры рельсов $+20^{\circ}\text{C}$ должны быть введены в оптимальную температуру закрепления или перезакреплены при промежуточной температуре ниже оптимальной при соблюдении требования, что разность между ожидаемой максимальной температурой плети (t_{max}) до ее закрепления на постоянный режим работы и температурой закрепления (t_3) будет ниже допустимого по устойчивости перепада температуры не менее чем на 10°C , т.е.

$$\Delta t = [\Delta t_y] - (t_{\text{max}} - t_3) \leq 10^{\circ}\text{C}.$$

Не рекомендуется в прямых и в кривых радиусами 800 м и более закреплять плети при температурах рельсов ниже -15°C , в кривых радиусами 350÷799 м ниже -10°C , а в кривых радиусами менее 350 м – ниже -5°C .

Выдержки из инструкции по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути

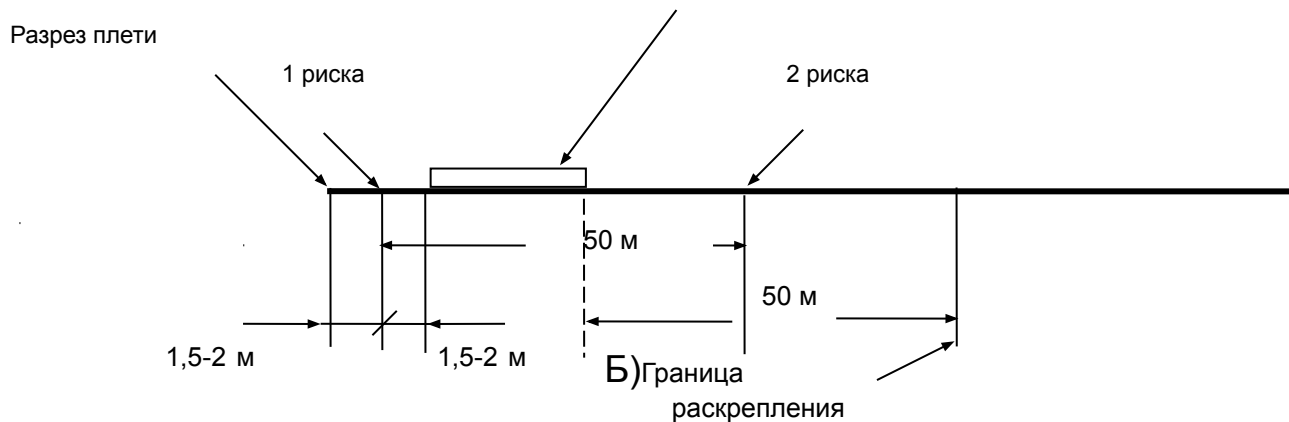
Использование данных путеизмерительных вагонов

С наступлением положительных температур рельсов необходимо обеспечить постоянный анализ изменения отступлений пути в плане по данным графических диаграмм путеизмерительных вагонов. При этом в период действия положительных температур рельсов (май-сентябрь) проверка путеизмерительными вагонами должна преимущественно производиться в дневное время суток. В случаях выявления в период между двумя проходами путеизмерительного вагона увеличенной разности стрел неровностей в плане на 10 мм и более необходимо принять меры по снятию продольных сил в рельсовых плетях и определить фактическую температуру их закрепления на участках, где наблюдается интенсивный рост величины отступлений пути в плане. Снятие продольных сил (разрядка напряжений) производится в плетях, где расстояние от их концов до отступления пути в плане не превышает 150 м.

При расстоянии от концов плети до отступления пути в плане более 150 м, если при визуальном осмотре пути не обнаружено грубых нарушений в его содержании (угон плетей, не заполнена балластная призма и т.д.), до наступления разности в 15°С между температурой рельса и температурой закрепления плетей устранение отступлений можно выполнить после регулировки напряжений в плетях на участке 100 м + неровность + 100 м. Регулировка напряжений выполняется по ходу движения поезда.

Выдержки из инструкции по устройству, укладке и содержанию бесстыкового пути Схема для определения абсолютной величины изменения длины участка

В случаях, если разность между температурой закрепления плети и температурой ее перед устранением отступления пути в плане равна 15°C и более по обеим рельсовым нитям, за $2\div 3$ м до начала неровности (по ходу движения поездов) необходимо выполнить разрезку каждой рельсовой нити бензорезом и отрихтовать путь. Перед разрезкой плетей на каждой рельсовой нити на расстоянии $1,5\div 2,0$ м от места планируемого реза (рисунок 4.1), необходимо нанести риски на рельсах и на шпале, а на расстоянии 50 м от них (по ходу движения поезда) нанести на рельсах и шпалах вторые риски. После разреза и раскрепления 50-метрового участка плети необходимо определить абсолютную величину его удлинения или укорочения.



Выдержки из инструкции по устройству, укладке и содержанию бесстыкового пути Определение фактической температуры закрепления 50-метрового участка пути

Изменения длины 50-метрового участка с точностью до 1 мм определяются по разнице перемещений двух рисок. В это же время производятся замеры температуры рельса (t_p). Фактическая температура закрепления плети $t_{зф}$ вычисляется по известной зависимости:

$$t_{зф} = t_p \pm \Delta l / \alpha l,$$

где «+» - уменьшение длины 50-метрового участка, а «-» - увеличение;

Δl – изменение длины 50-метрового участка, мм;

α - коэффициент температурного расширения рельсовой стали, равный 0,0000118, $1/^\circ\text{C}$;

l – длина 50-метрового участка в мм;

$$\alpha l = 0,6 \text{ мм}/^\circ\text{C}.$$

Выдержки из инструкции по устройству, укладке и содержанию бесстыкового пути

Определение фактической температуры закрепления

Если после принятых мер смещения контрольных сечений превышают 5 мм, а изменения расстояний между «маячными» шпалами в сторону уменьшения превышают 10 мм, то на коротких плетях должна быть выполнена разрядка напряжений с введением их в оптимальную температуру закрепления. На длинных плетях определяется отклонение фактической температуры закрепления этого участка плети от первоначальной температуры закрепления:

для рельсов типа Р65 $\Delta t = \pm 85 \Delta l / l$

где Δl - измеренное фактическое удлинение («+») или укорочение («-») плети, мм;

l - расстояние между «маячными» шпалами, м.

Значение фактической температуры закрепления

$$t_o = t_3 \pm \Delta t$$

где t_3 - температура закрепления плети на постоянный режим работы (при укладке, разрядке, регулировке напряжений), °С.

Если t_o не выходит за нижний предел оптимальной температуры закрепления, то ее заносят в Журнал учета службы коротких плетей, прилагаемый к Паспорту-карте длинной плети и ею руководствуются при дальнейшей эксплуатации длинной плети (при ремонтных работах и пр.).

Если t_o выходит за нижний предел оптимального интервала ($t_o - 5^\circ\text{C}$), то принимаются меры по введению ее в оптимальную температуру закрепления с разрезкой и последующим восстановлением плетей сваркой.

Выдержки из инструкции по устройству, укладке и содержанию бесстыкового пути

Допускаемые изменения температуры рельсовых плетей при текущем содержании бесстыкового пути

Путевые работы	Предельная высота подъёмки или размер сдвижки при рихтовке, см	Допускаемое превышение температуры плетей, °С, относительно температуры их закрепления			
		в прямом участке	в кривой радиусом, м		
			800 и более	500÷799	250÷499
Исправление просядок, толчков и перекосов с вывеской путевой решетки домкратами	2	20	15	10	5
Вывеска решетки домкратами	6	15	10	5	5
Рихтовка гидравлическими приборами	1	15	15	10	5
	6	15	10	5	5
Вырезка балласта до уровня подошвы шпал на длине пути до	0	20	15	10	5
Одиночная смена шпал с вывеской решетки до при условии, что между одновременно заменяемыми шпалами расположено не менее 20-ти прикрепленных шпал	2	20	15	10	5
Одиночная смена не более 3-х шпал в одном месте без вывески решетки при условии, что между заменяемыми участками шпал расположено не менее 20 прикрепленных шпал	0	15	10	10	5
То же с вывеской решетки до	2	10	10	5	5

Выдержки из инструкции по устройству, укладке и содержанию бесстыкового пути

Допускаемые изменения температуры рельсовых плетей при работе путевых машин

Машины	Допускаемое отклонение температуры плетей с отдельными креплениями, °С, от температуры закрепления в сторону			
	Повышения		понижения	
	в прямых участках и в кривых $R \geq$	в кривых радиусом $R <$	в прямых участках и в кривых $R \geq$	в кривых радиусом $R <$
Щебнеочистительные баровые: ЩОМ-6Б, СЧ-600, СЧ-601, СЧУ-800, РМ-76, РМ80, РМ-2002, ОТ-400, ОТ-800, АХМ-801	15	10	20	15
Щебнеочистительные роторные:				
ЩОМ-6Р, УМ-М	20	20	25	20
Балластировочные и рихтовочные: ЭЛБ-3, ЭЛБ-4, ЭЛБ-1Р, ЭЛБ-3МК, Р-2000, Р-02, ПРБ	5	0	25	20
Выправочно-подбивочные: ВПО-3000, ВПО-3-3000, ВПР-1200, ВПР-02, «Дуоматик», ВПРС-500, ВПРС-02, ВПРС-03, «Унимат», Динамик 09-3х	15	15	25	20
Динамические стабилизаторы ДСП, ДСПС, СПП,	20	20	25	20

- Примечания. 1. При работе роторных щебнеочистительных машин без вырезки балласта под рельсошпальной решеткой внутренние стенки траншей должны находиться от торцов шпал не ближе 15-25 см.
2. При работе выправочно-подбивочных машин перед проходом динамических стабилизаторов включают уплотнители откосов с предварительным заполнением шпальных ящиков слоем щебня не менее 2/3 толщины железобетонной шпалы в средней части и шириной плеча по верху торцов шпал не менее 25 см, а также обеспечением прижатия рельсов промежуточными рельсовыми креплениями по существующим нормам.
3. После работы указанных машин, если температура рельсов превышает температуру закрепления более чем на 15°С, то до наработки тоннажа 1,0 млн. т брутто скорость движения поездов ограничивается до 60 км/ч.

Выдержки из инструкции по устройству, укладке и содержанию бесстыкового пути

Определение параметров закрепления рельсовых плетей вне оптимальных температур

Удлинение плетей перед вводом их в оптимальную температуру закрепления определяется по формуле:

$$\Delta L = \alpha L \Delta t$$

где α - коэффициент температурного расширения рельсовой стали, равный 0,0000118;
 L - длина плети, мм;
 Δt - перепад температуры рельсовой плети при проведении работ относительно планируемой температуры закрепления, °С.

Усилия для создания расчетных удлинений в плетях (N_p) определяются из условия:

$$N_p = N_t + N'$$

где N_t - усилия, необходимые для растяжения плети, определяемые из условия $N_t = \alpha E F \cdot \Delta t$,
 N' - усилия, необходимые для преодоления сопротивления перемещению плети при ее удлинении, принимаемое равным 0,1 N_t ;
 E - модуль упругости рельсовой стали, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа ($2,1 \cdot 10^6$ кг/см²);
 F - площадь поперечного сечения рельса, см².

Длина анкерного участка со стороны неподвижного торцевого сечения конца плети определяется по формуле

$$l_{ан_1} \geq N_t / r + 5, \text{ м}$$

где r - погонное сопротивление сдвигу рельсошпальной решетки в балласте по одной рельсовой нити. В уплотненном балласте $r = 12$ кН/м, а в неуплотненном – 7 кН/м.

$$l_{ан_2} \geq N_p / r + 5$$

Длина анкерного участка в месте установки ГНУ со стороны подвижного конца плети определяется из условия

Состояние бесстыкового пути на участках схода

Номер схода	Наработка пути, млн. т груза брутто до схода	Перепад температуры рельсов относительно температуры закрепления $\Delta t_y, ^\circ\text{C}$	Разность $[\Delta t_y] - \Delta t_y, ^\circ\text{C}$	Балльность пути	Отступления в содержании пути			Дата посл. прохода ПС	
					План	Профиль	Балластная призма		Промежуточные скрепления
1	472	19	35	150	Неровность со стрелой 27 мм	Просадки до 24 мм (3-й степени)	(Щебень) Балластная призма без плеча	60 % незакрепленных клеммных болтов	18.05.2000
2	122,8	12	42	40	Угол 16 мм		(Асбест) Разжижение балласта	Ослабленная затяжка клеммных и закладных болтов	11.06.2000
3	171	13	34	10			50 % щебня в шпальных ящиках у торцов шпал		27.06.2000
4	112	15	33	500	Неровности со стрелой 39 мм на 14 м и 46 мм на 20 м				15.07.01
5		19	26	500		Перекос 47 мм на 26 м, устранен 12.07.02			11.07.02
6	127	10	38	40	Отступление 2-й степени		—		14.05.03
7	208	11	43	40	—		—	Недостаточная затяжка болтов	14.05.03
8	159	17	31	40			50 % щебня в шпальных ящиках у торцов шпал		24.05.04
9	40	12	34	40			Отсутствие щебня в середине шпальных ящиков		30.05.04
10	360,4	10	33	40				28 % негодных скреплений, 369 негодных шпал	23.05.04
12	715	16	38	40	Отступление 2-й степени	Отступление 2-й степени	Отсутствие плеча балластной призмы в месте смены шпал, балласт не уплотнен		15.07.05
14	305	19	24	10			Недостаточно балласта	—	29.07.06
15	450	3	39	10			Участок не засыпан балластом	Ослабленная затяжка клеммных болтов	26.04.07
16		20	24	10			—	—	14.05.07
17		17	37	40			—	15 % незакрепленных болтов	29.05.07
18	960	18	36	150	Отступление 3-й степени (27 мм на 20 м)			Ослабленная затяжка болтов	29.05.07
19	481	21	27	150		—	—	Скрепления ЖБР не закреплены	17.06.07

Основные характеристики участков сходов поездов

В груженных грузовых поездах сошедшие вагоны находились, как правило, в головной части или в первой половине поезда. В хвосте сходили одиночные вагоны или не более трех.

В порожних грузовых поездах сошедшие вагоны находились во второй половине состава (ближе к концу), причем количество таких вагонов было почти вдвое больше, чем в груженных поездах.

В электропоездах и пригородных поездах сходили только последние вагоны.

При движении поезда в режиме тяги впереди него в рельсах возникает зона растяжения, а сзади локомотивов (под поездом) зона сжатия. Этим могут быть объяснены в первом приближении сходы групп вагонов в первой (головной) половине грузовых поездов (сходы №№ 7, 15, 18), шедших на подъем в режиме тяги. В этих случаях локомотивы и часть вагонов за ними прошли участок, на котором произошел сход.

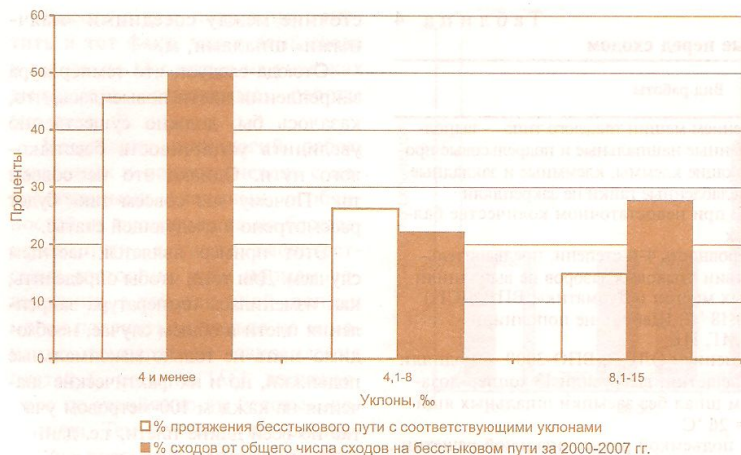


Рис. 6. Количество сходов, %, в зависимости от уклона линии

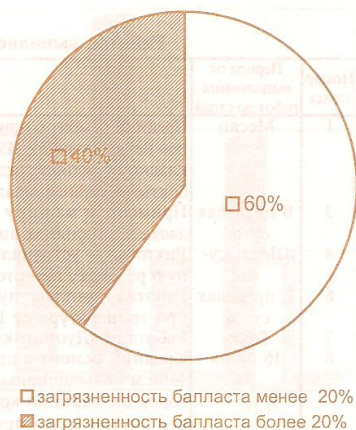
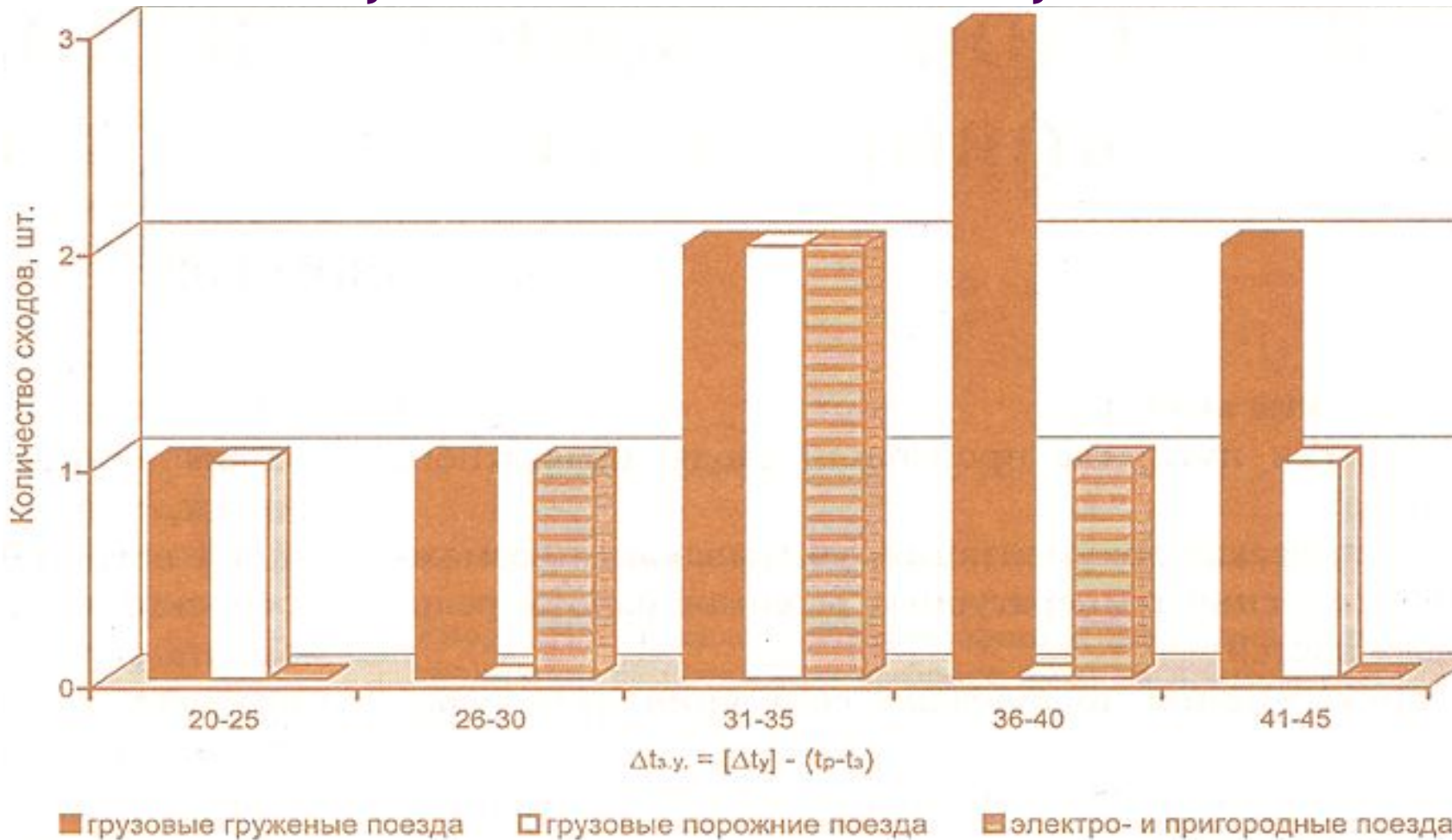


Рис. 7. Распределение сходов в зависимости от загрязненности балласта

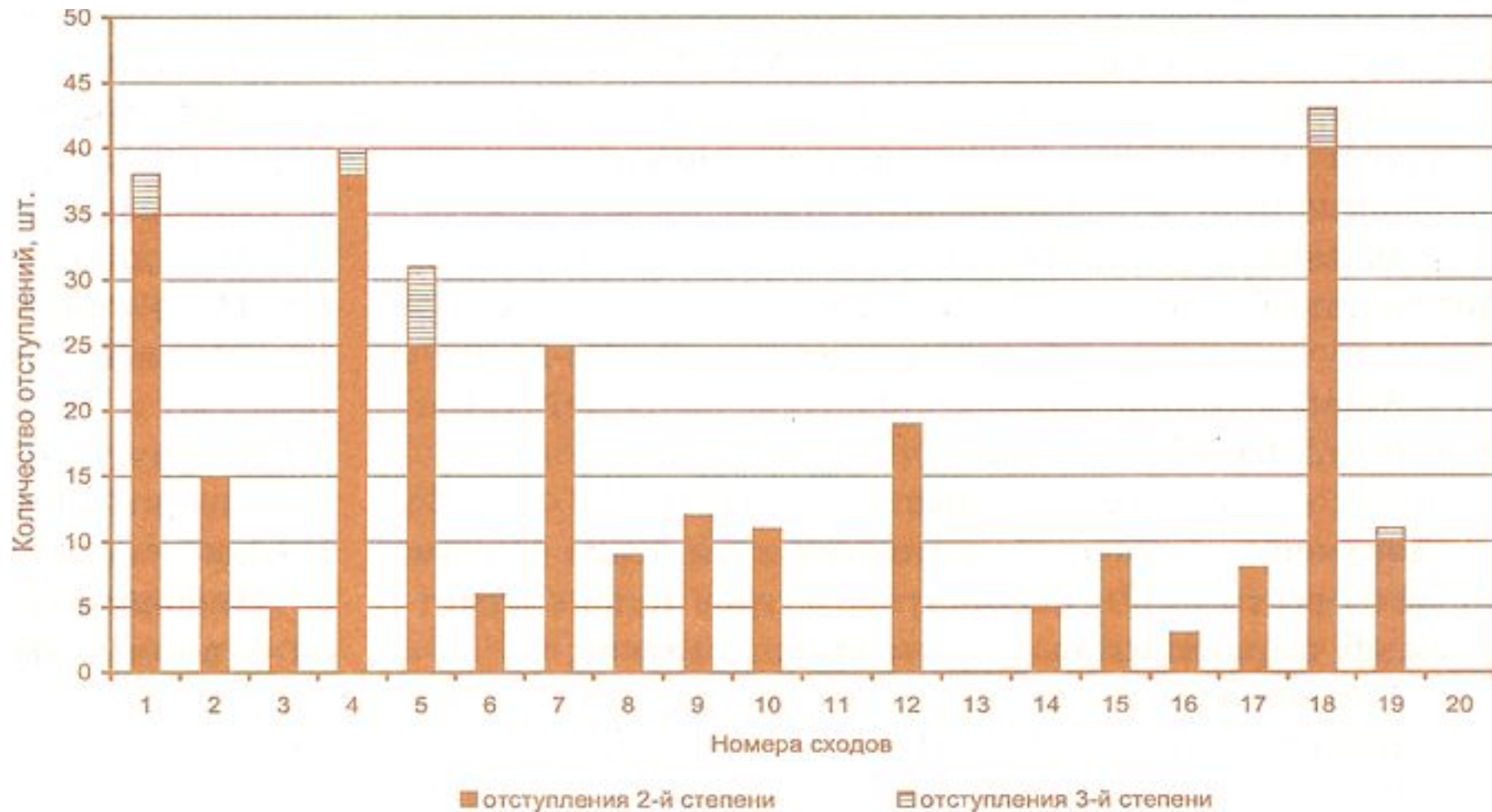
При рекуперативном (реостатном) или пневматическом локомотивами торможении впереди поезда в рельсах появляется зона сжатия, а под поездом — зона растяжения. При пневматическом торможении всего поезда (состава) в рельсах под головной частью поезда возникают сжимающие продольные силы, в хвостовой — растягивающие.

Сжимающие продольные силы, возникшие в рельсах от воздействия подвижного состава, в совокупности с температурными силами в определенных условиях могут привести к появлению поперечных сил, которые превысят сопротивление пути поперечному сдвигу и, в конечном итоге, стать причиной схода подвижного состава, который при расследованиях квалифицируют как выброс пути.

Распределение сходов в зависимости от температурного запаса устойчивости бесстыкового пути



Количество отступлений 2-й и 3-й степени на участках схода



Распределение сходов в зависимости от количества отступлений 2-й степени



Расчет пути на прочность с учетом температурных напряжений

Бесстыковой путь рассчитывают на прочность по условию:

$$k_3 \sigma_k + \sigma_t \leq [\sigma],$$

где σ_k — кромочные напряжения в рельсе;
 σ_t — напряжения от температурных сил;
 $[\sigma]$ — допускаемые напряжения; ($[\sigma] = 400$ МПа для для термообработанных рельсов.

При приемке рельсов рельсов $[\sigma] = 736$ Мпа;

k_3 — коэффициент запаса прочности, принято $k_3 = 1,3$.

Расчетная схема

Температурные силы и напряжения, возникающие в рельсах от этих сил, не зависят от длины рельсовых плетей. Поскольку длина рельсовых плетей бесстыкового пути в расчетной схеме принимается бесконечной, то изменение продольной силы в таком рельсе равносильно ее изменению на элементарном участке длиной l , концы которого находятся в жесткой заделке. На таком участке при изменении температуры его длина не изменяется. На участке без жесткого защемления температурное изменение длины будет:

$$\lambda_t = \alpha l \Delta t,$$

где α — коэффициент температурного расширения для рельсов, $\alpha = 11,8 \cdot 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$;
 Δt — разница температуры стержня до и после его нагрева (охлаждения).



Участок рельсовой плети в жесткой заделке (в шпальном ящике)

Определение продольных температурных сил

Возникающая температурная продольная сила F_t на элементарном участке с концами в жесткой заделке может быть вычислена с использованием закона Гука:

$$F_t = \sigma_t \omega = E \varepsilon \omega,$$

где $\varepsilon = \lambda/l$ — относительная продольная деформация участка;

ω — площадь поперечного сечения рельса.

Определение температурных напряжений

Если температурные напряжения не превысят предел упругости материала и рельс не изогнется, то несостоявшееся температурное изменение длины будет равно абсолютной деформации в рельсе под действием силы:

$$\lambda_t = \lambda$$

Тогда, после подстановок, будет получено соответственно:

$$1. F_t = \alpha E \omega \Delta t,$$

l :

$$2. \sigma_t = \alpha E \Delta t$$

Вывод: температурные напряжения не зависят от длины плети

Определение верхней границы температурного интервала

Верхнюю границу температурного интервала, в котором можно, по условию прочности, закреплять рельсовые плети определяют по условию:

$$\max t_z = t_{\min \min} + \Delta t_p,$$

где Δt_p — максимально допустимое по условию прочности отступление от температуры закрепления в сторону понижения.

Определение нижней границы температурного интервала

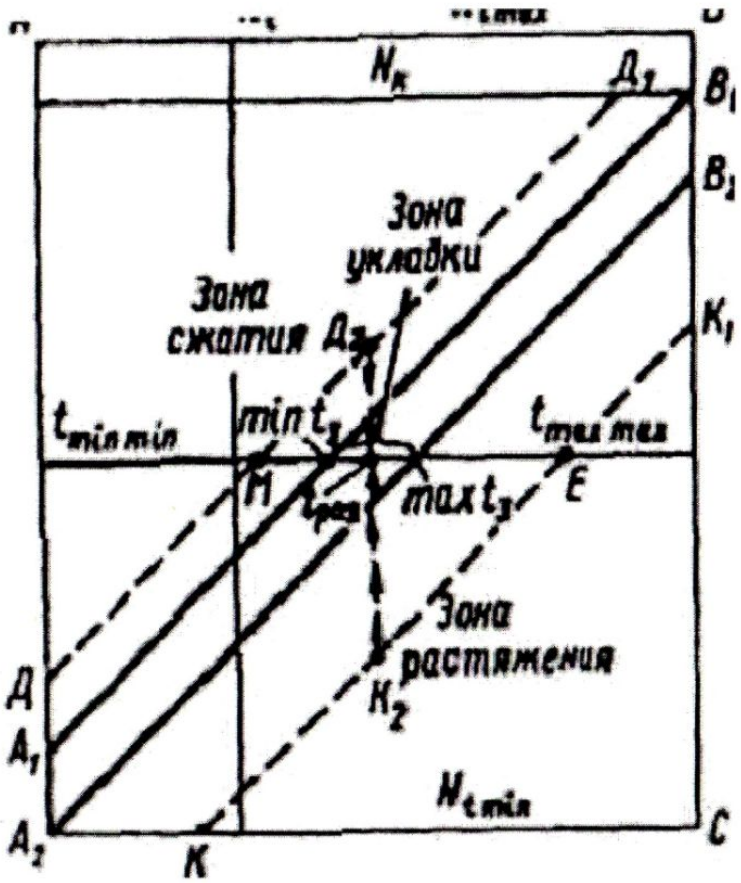
Нижнюю границу температурного интервала, в котором можно, по условию устойчивости закреплять рельсовые плети, определяют по формуле:

$$\max t_3 = t_{\max\max} - \Delta t_y,$$

где Δt_y — максимально допустимое по условию устойчивости отступление от температуры закрепления в сторону повышения

Расчет интервала температур закрепления плетей

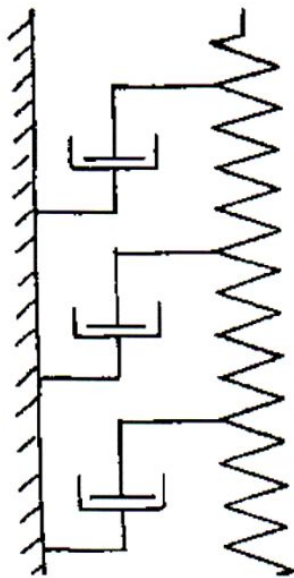
(основной результат расчетов устойчивости бесстыкового пути существующими методами)



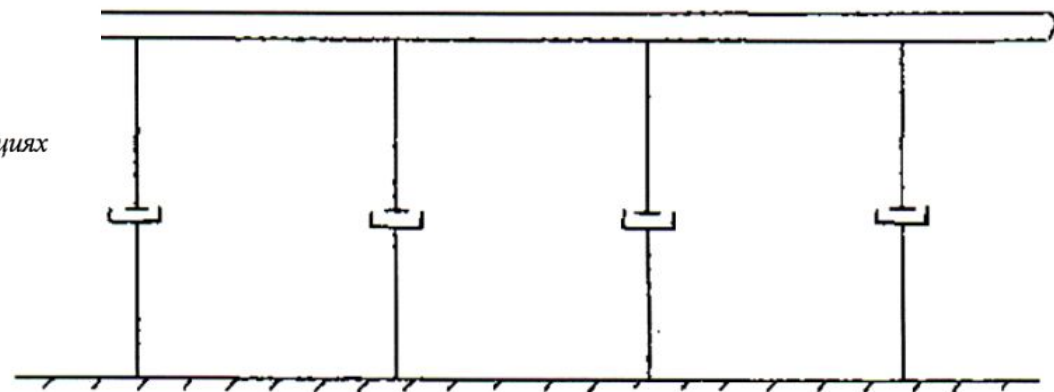
$$min t_3 = T_{max} - [\Delta t_y];$$

$$max t_3 = t_{min} + [\Delta t_p].$$

Реологические модели бесстыкового пути



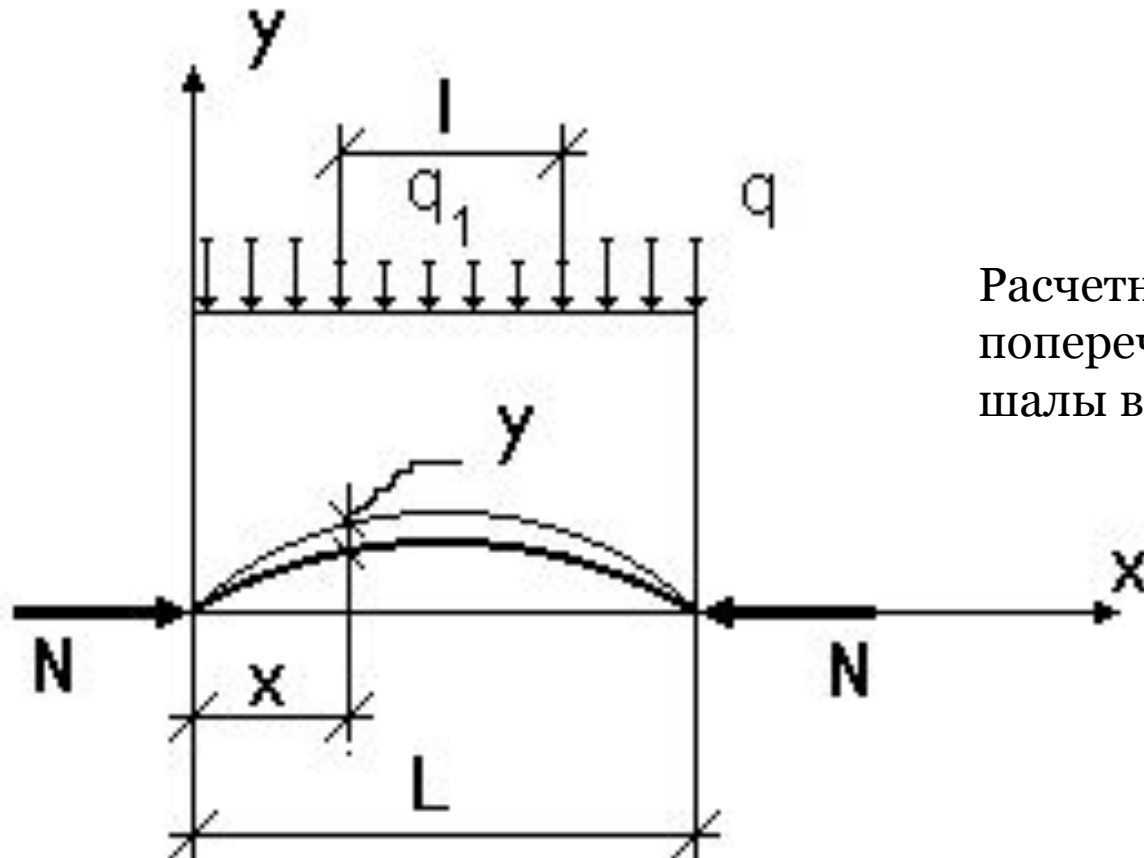
Реологическая модель бесстыкового пути при продольных деформациях



Реологическая модель бесстыкового пути при поперечных деформациях

Количественная оценка устойчивости бесстыкового пути при наличии отступлений от норм содержания

(По методике проф. Ершова В.В.)



Расчетная схема для определения поперечного сопротивления сдвига шалы в балласте

Превышение температуры рельсов, соответствующее предельному условию устойчивости бесстыкового пути при наличии неподбитых шпал

Определение $\Delta\Delta t_{\text{уу}}^{\text{н.шп}}$ и $\Delta\Delta t_{\text{уу.уд.}}^{\text{н.шп}}$

	n _{н.шп} , шт.	Радиус кривой, м									
		прям	2000	1200	1000	800	600	500	400	350	
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	
1	2	6,7	6,2	6,3	6,1	5,9	5,4	4,2	3,7	3,4	
2	4	3,4	3,1	3,2	3,0	3,0	2,7	2,1	1,8	1,7	
3	6	13,4	12,3	12,7	12,2	11,7	10,8	8,4	7,4	6,8	
4	8	3,4	3,1	3,2	3,0	2,9	2,7	2,1	1,8	1,7	
5	Среднее по R	20,0	18,5	19,0	18,4	17,6	16,2	12,6	11,2	10,2	
6	Среднее по групп. R	3,3	3,1	3,2	3,1	2,9	2,7	2,1	1,9	1,7	
		26,7	24,7	25,3	24,6	23,5	21,6	13,4	11,9	10,8	
		3,3	3,3	3,2	3,1	2,9	2,7	1,7	1,5	1,4	
5	Среднее по R	3,4	3,1	3,2	3,0	2,9	2,7	2,0	1,8	1,6	
6	Среднее по групп. R	3,0						1,8			

Примечание к таблице 2.: числитель – значения $\Delta\Delta t_{\text{уу}}^{\text{н.шп}}$ – количественная оценка снижения превышений температуры рельсов при наличии неподбитых шпал, знаменатель – значения $\Delta\Delta t_{\text{уу.уд.}}^{\text{н.шп}}$ – удельные (отнесенные к одной шпале) значения необходимого снижения температуры рельсов

Понятие эквивалентного сопротивления $q_{\text{Э}}$

Это некое постоянное по величине на длине L сопротивление, эквивалентное сопротивлению пути с не подбитыми шпалами, определяемое по формуле:

$$q_{\text{Э}} = q [1 - 0,5 \cos \pi (L - l) \cdot 2L]$$

$$l = l_{\text{ЭП}} n_{\text{н..шп}}$$

где L – длина участка поперечной деформации, (по данным Е.М. Бромберга при $R < 600$ м $L = 6,0$ м а в остальных случаях $L = 8,0$ м)

l – то же с ослабленным сопротивлением сдвигу, т.е. с не подбитыми шпалами. Значение l можно определить по формуле:

где $l_{\text{ЭП}}$ – расстояние между осями шпал, $n_{\text{н..шп}}$ – количество не подбитых шпал.

Конечной целью оценки устойчивости бесстыкового пути при наличии неподбитых шпал является определение максимальных допустимых превышений температур и определение коэффициента устойчивости.

Количественная оценка устойчивости бесстыкового пути при наличии отступлений от норм содержания

Определение $n_{н.шп}$

	Показатели.	Радиус кривой, м								
		прям	2000	1200	1000	800	600	500	400	350
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
1	Среднее по R	3,4	3,1	3,2	3,0	2,9	2,7	2,0	1,8	1,6
2	Δt_{yy}	55,7	51,4	52,8	51,2	48,9	45,0	41,9	37,2	33,9
3	$0,066 R K_{упр}$ $K_{эп}$	291	148	97	74	67	51	43	37	35
4	$n_{н.шп}$	69	31	13	7,6	6,2	2,2	0,6	-	0,7

Учет Δt_{yy} позволяет уточнить допускаемые по условию устойчивости пути превышения температур над температурой закрепления для расширения диапазона выполняемых путевых работ при высоких температурах.

Коэффициент снижения поперечного сдвига шпалы

	$n_{н.шп.}$, шт.	L, м	l, м	$0,5\cos = \frac{\pi(L-l)}{2L}$	$K_{q.н. шп}$	$\Delta q =$ $(1 - K_{q.н. шп}) * q_{max}$	$\Delta q_{уд} =$ $\frac{\Delta q_{н.шп.}}{n_{н.шп.}}$	$\Delta K_{q.н. шп.уд} =$ $\frac{\Delta q_{уд.н.шп.}}{q_{max}}$
	1	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
1	2	1,0	<u>6</u>	0,13	0,87	0,35	0,175	0,064
			8	0,10	0,90	0,27	0,135	0,05
2	4	2,0	<u>6</u>	0,25	0,75	0,68	0,170	0,06
			8	0,19	0,81	0,52	0,130	0,05
3	6	3,0	<u>6</u>	0,35	0,65	0,95	0,160	0,06
			8	0,28	0,72	0,76	0,130	0,05
4	8	4,0	<u>6</u>	0,43	0,57	1,17	0,150	0,06
			8	0,35	0,65	0,95	0,120	0,04

$$\Delta q_{н.шп.} = (1 - K_{q.н. шп}) / q_{max},$$

В таблице 1 (столбец 6) приведены численные значения снижения сопротивления на длине участка L при количестве не подбитых шпал, указанных в столбце 1.

Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Условия нагрева рельсовой плети при торможении

$$F_0 = \frac{at}{b^2}$$

где $a = \lambda / \gamma c$ – коэффициент температуропроводности (λ – коэффициент теплопроводности, γ – плотность, c – удельная теплоемкость материала),
 t – время торможения,
 b – толщина нагреваемого тела.

изменение температуры $d(\Delta\tau)$ к моменту t ,

$$d(\Delta\tau) = \frac{g(t)dt}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}} e^{-\frac{x^2}{4a(t-t_0)}}$$

С учетом отдачи тепла с поверхности трения в окружающую среду имеем

$$g(t) = g_0 \left(1 - \frac{t}{t_0} \right) - a\Delta\tau_n$$

Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Расчет температуры на поверхности трения колес и тормозных колодок

$$\Delta \tau_n = \frac{q_T}{\alpha_0} \left[1 - e^{-\frac{2\alpha_0}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}} \sqrt{t} \left(1 - \frac{2}{3} \frac{t}{t_n} \right)} \right]$$

Наибольшая температура при остановочном торможении на поверхности колеса достигается в середине этого процесса $t = 0,5t_n$:

$$\Delta \tau_{n \max} = \frac{q_T}{\alpha_0} \left(1 - e^{-0,9433 \frac{\alpha_0}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}} \sqrt{t_n}} \right)$$

Температура на поверхности колеса в момент остановки поезда ($t = t_n$):

$$\Delta \tau_{nk} = \frac{q_T}{\alpha_0} \left(1 - e^{-0,667 \frac{\alpha_0}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}} \sqrt{t_n}} \right)$$

Температура при установившемся торможении (с постоянной скоростью):

$$\Delta \tau_{\infty} = \frac{q_T}{\alpha_0} \left(1 - e^{-2 \frac{\alpha_0}{\sqrt{\pi\lambda\gamma c}} \sqrt{t_n}} \right)$$

где q_T – плотность теплового потока, ккал/(м²с);
 λ – коэффициент теплопроводности, ккал/(м · °С);
 γ – удельный вес, кгс/м³;
 c – удельная теплоемкость, ккал/(кгс · °С);
 t_n – время торможения до остановки, с;

Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Температурные пульсации

Расчет температуры в пятне фактического контакта

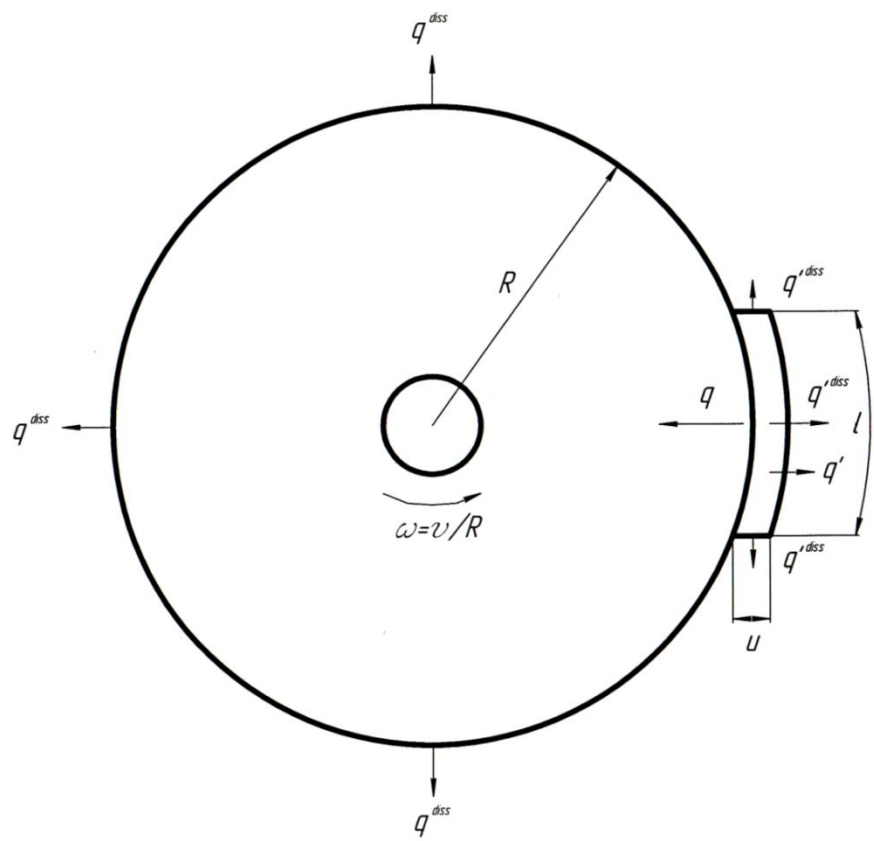
$$\Delta \tau_{nv} = \frac{2g_v}{\pi \lambda \gamma c} \left(1 - \frac{2t}{3t_v} \right) \sqrt{t}$$

при этом q_b – плотность теплового потока в пятне фактического контакта – значительно превышает ее среднее значение, отнесенное ко всей геометрической контактирующей площади.

$$\Delta \tau_{nv} = \frac{2g_v}{\sqrt{\pi \lambda \gamma c}} \sqrt{t}$$

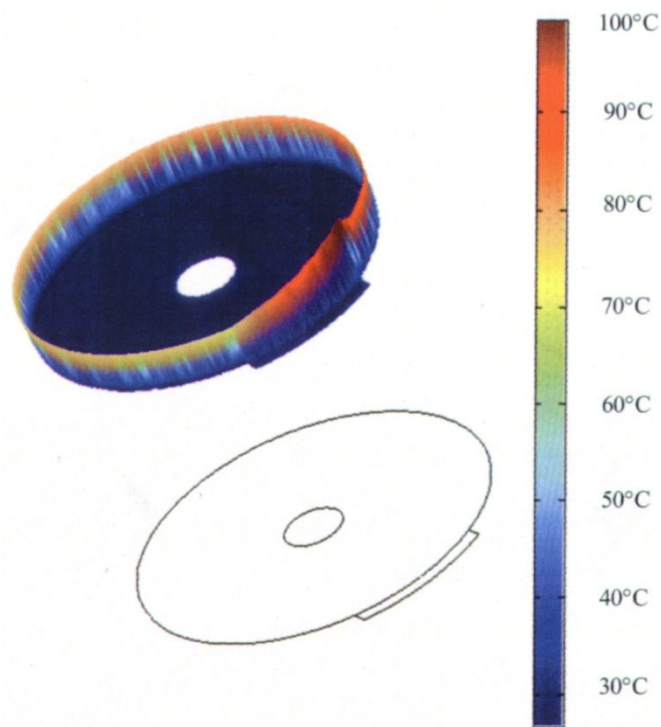
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Распределение тепловых потоков в системе «колесо-колодка»

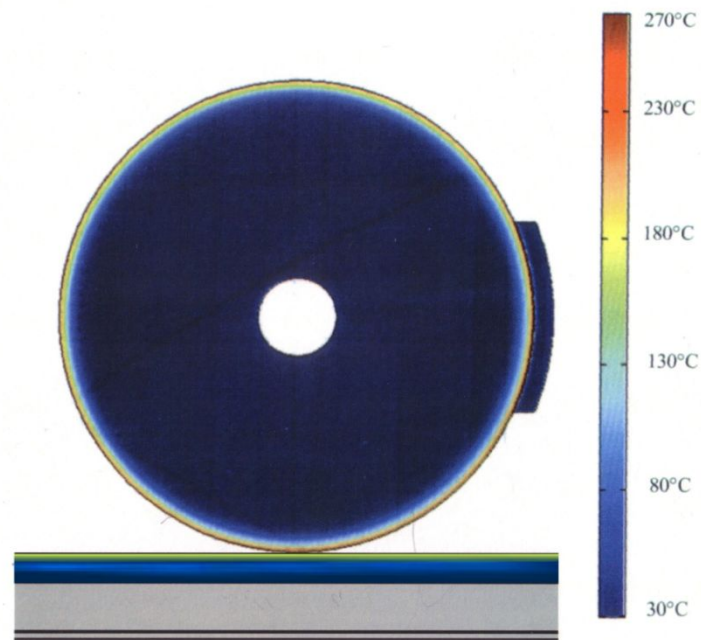


Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Распределение температур

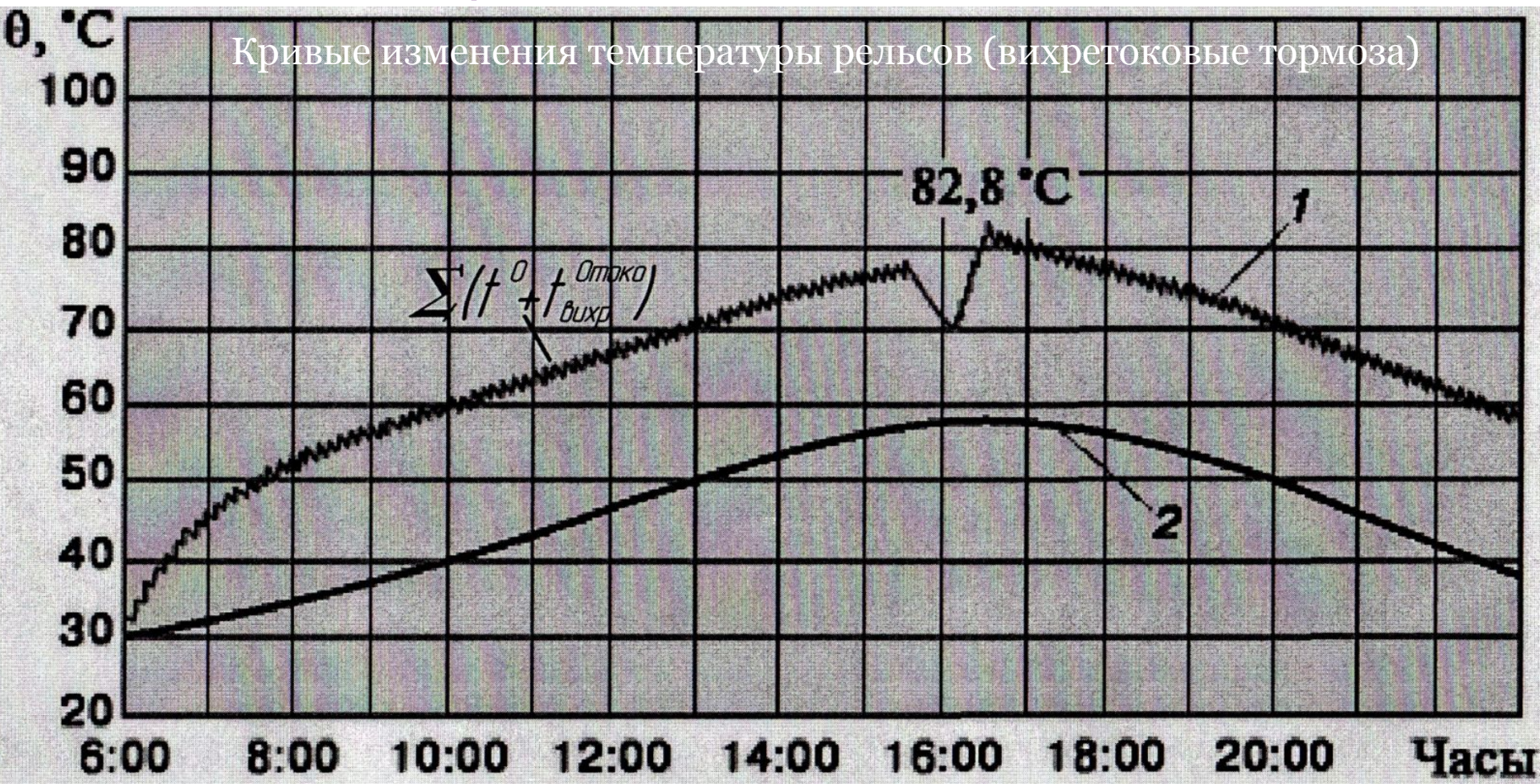


Распределение температуры в колесе и колодке через 1 с после начала торможения



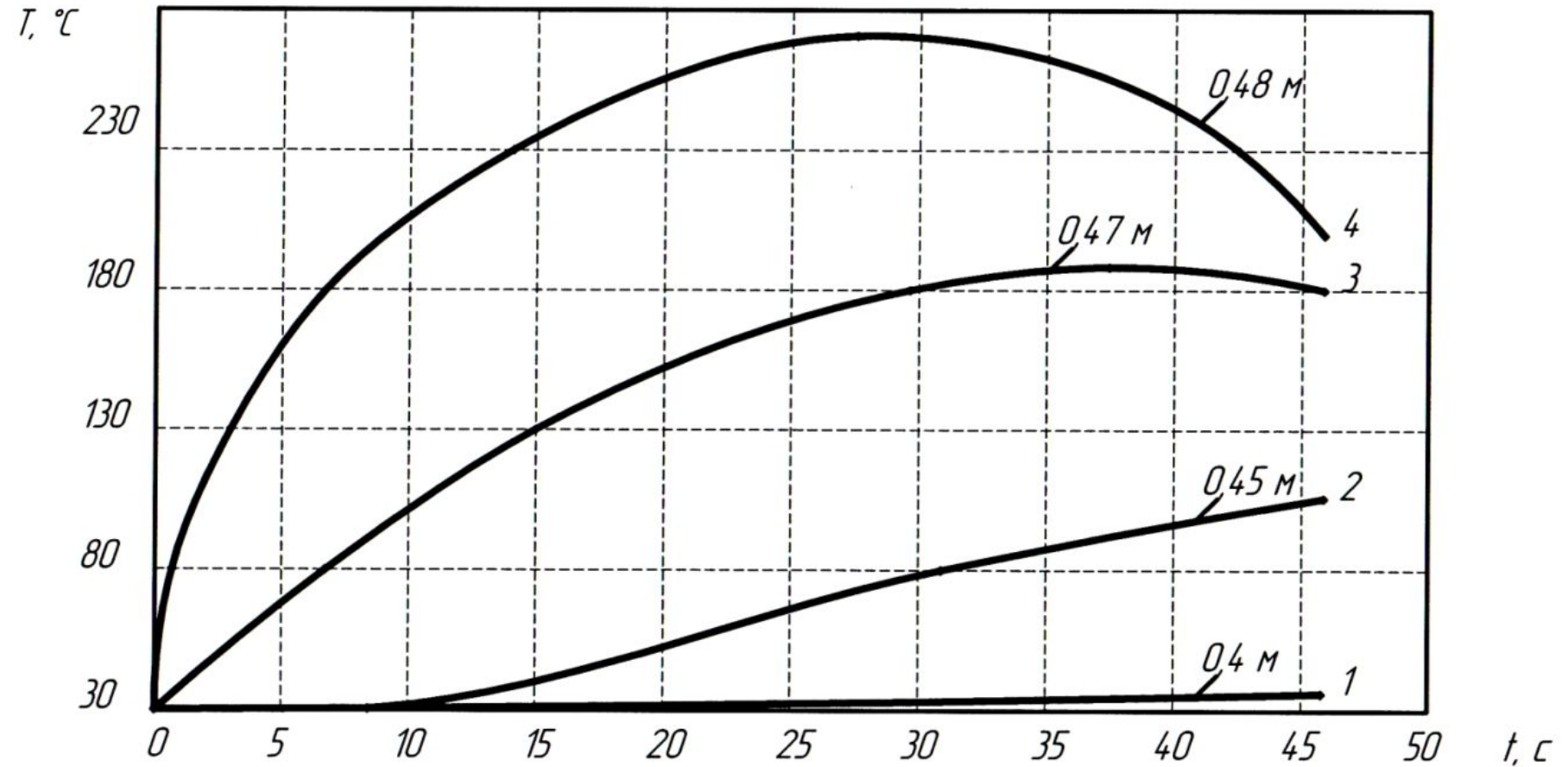
Распределение температуры в колесе и колодке через $t \approx 28$ с от начала торможения

Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

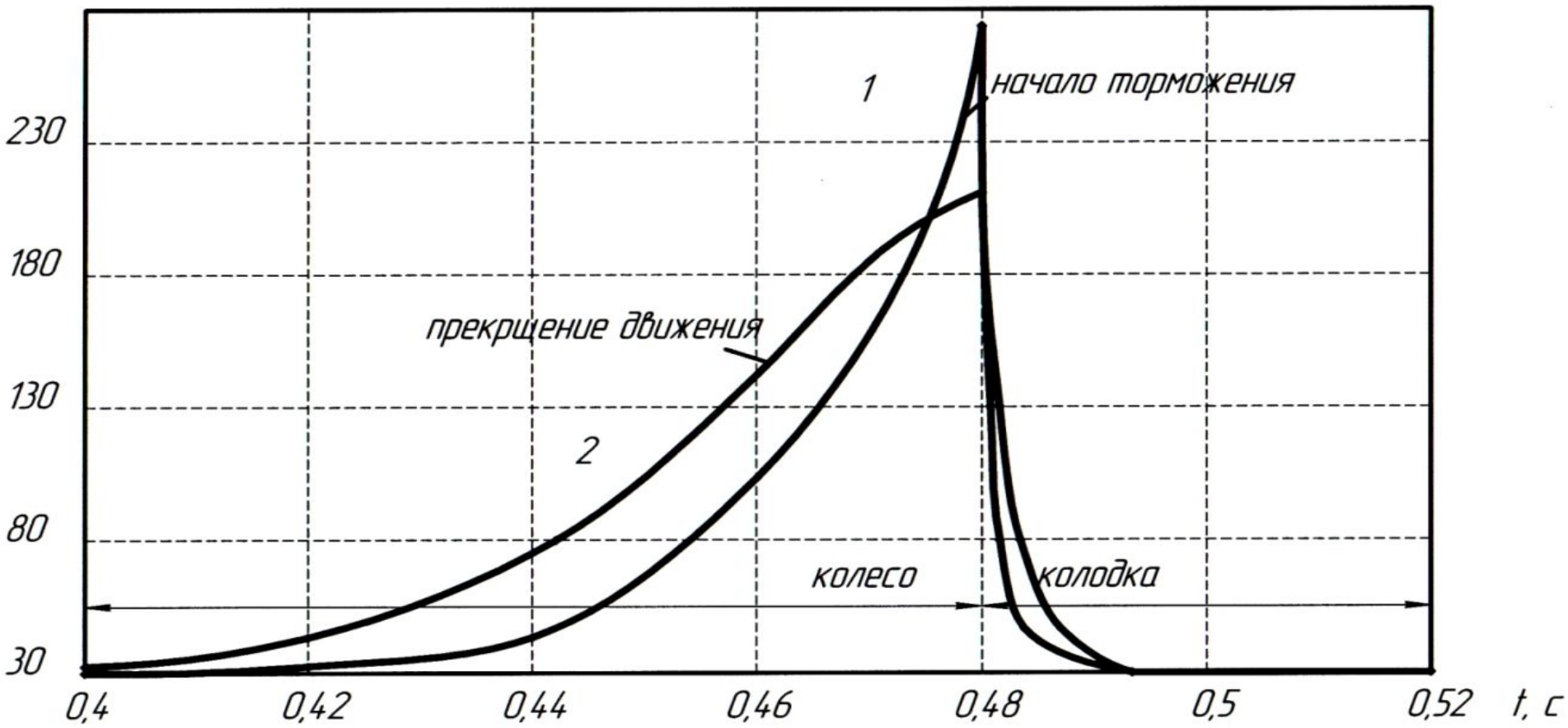
Распределение температур отдельных точек колеса (от центра колеса)



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Нагрев колес в различные периоды торможения

$T, ^\circ\text{C}$



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Постановка задачи исследования

$$\frac{\partial T}{\partial t} = V \frac{\partial T}{\partial x_2}$$

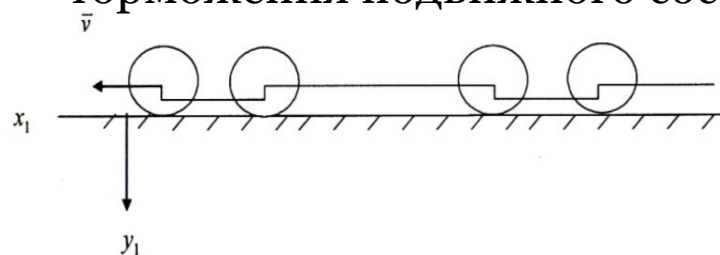
$$\frac{V}{a} \frac{\partial T}{\partial x_2} = \frac{\partial^2 T}{\partial y_2^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2}$$

Граничные условия

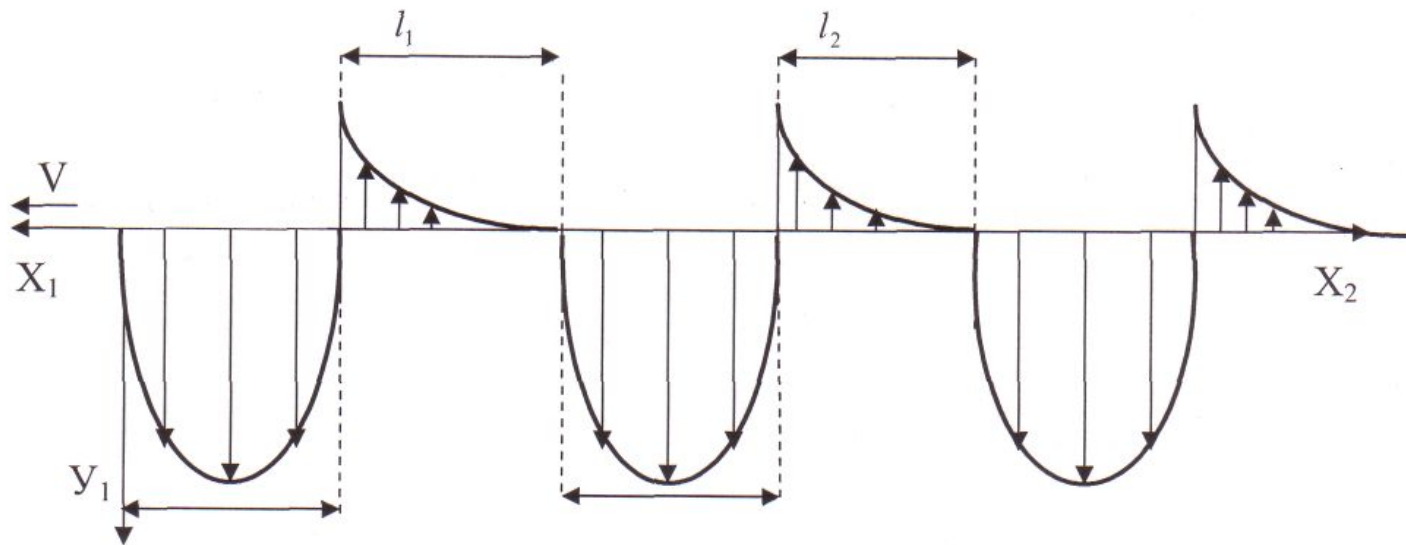
$$\lambda \frac{\partial T(0, x_2)}{\partial y_2} = \begin{cases} q_1(x_2), 0 \leq x_2 \leq \delta^* \\ -\mu_1 T(0, x_2), \delta^* < x_2 < l^2 \end{cases}$$

Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Математическая модель расчета температур в рельсовых плетях в процессе торможения подвижного состава



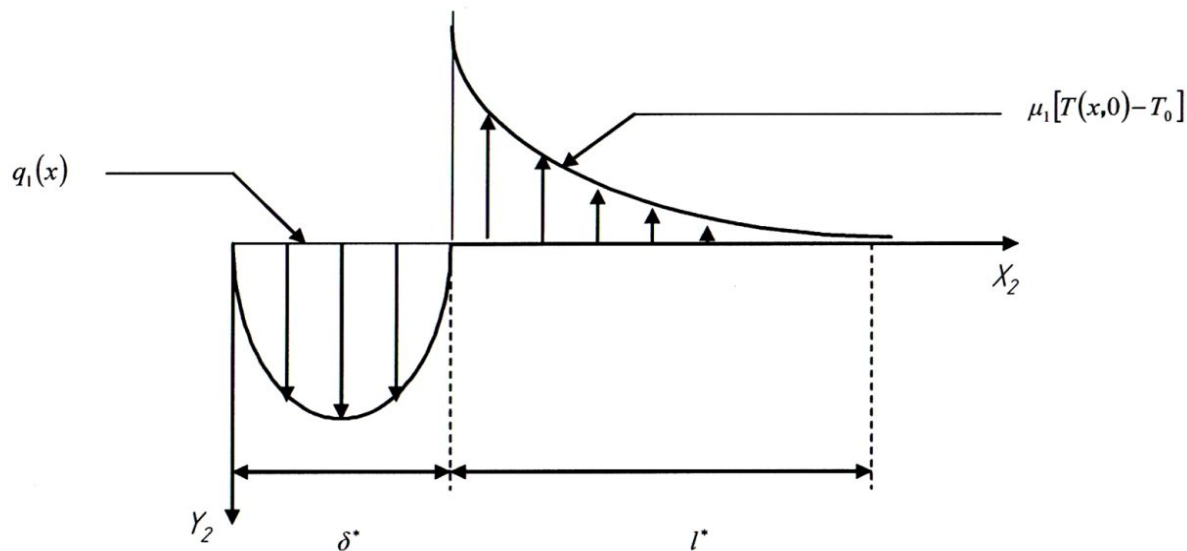
Распределение тепловых потоков в поверхностном слое рельса при движении состава.



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Модель элементарного участка

Значения температур $T(y_2, x_2)$ на отрезке $0 \leq x_2 < \delta^* + l^*$



$q_1(x)$ – удельный тепловой поток в рельс в зоне контакта;

μ_1 – коэффициент теплоотдачи;

T_0 – температура окружающей среды (предполагаем постоянной, равной нулю).

Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Асимптотический расчет температур в профиле рельса при прохождении состава

$$\alpha \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$$

с граничными условиями

$$\frac{\partial \theta(0, x)}{\partial y} = \begin{cases} -q(x) & \text{при } 0 \leq x \leq \delta \\ \mu \theta(0, x) & \text{при } \delta < x < 2\pi \end{cases}$$

В уравнении $\alpha = \frac{v l_m}{a}$ – число Пекле (критерий Pe).

$$\int_0^{2\pi} \frac{\partial \theta(0, x)}{\partial y} \partial x = 0$$

Рассматриваемая задача состоит в том, чтобы вычислить решение $\theta(y, x)$ уравнения в частных производных, удовлетворяющее граничным условиям и стремящееся к нулю с возрастанием координаты y .

Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Переход к безразмерным координатам y, x

$$\left. \begin{aligned} y &= l_m \cdot y_2 \\ x &= l_m \cdot x_2 \end{aligned} \right\}$$

где $l_m = \frac{2\pi}{l^* + \delta^*}$

- линейный масштабный коэффициент;
а также к безразмерной температуре

$$\theta = \frac{T}{T_m}$$

T_m - масштабное значение температуры;
безразмерному удельному тепловому потоку

$$q(x) = \frac{q_1(x)}{\lambda T_m}$$

безразмерному коэффициенту теплоотдачи

$$\mu = \frac{\mu_1}{\lambda}$$

Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Распределение температур в полуплоскости
(уравнение теплопроводности)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} \right)$$

где: a - коэффициент температуропроводности.

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_n = \delta^* \\ l_1 = l_2 = \dots = l_n = l^* \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} y_2 = y_1 \\ x_2 = -x_1 + vt \end{aligned} \right\}$$

Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Окончательный вид зависимости для определения дополнительного нагрева рельсов

Функция $\theta_0(y, x)$ является решением задачи:

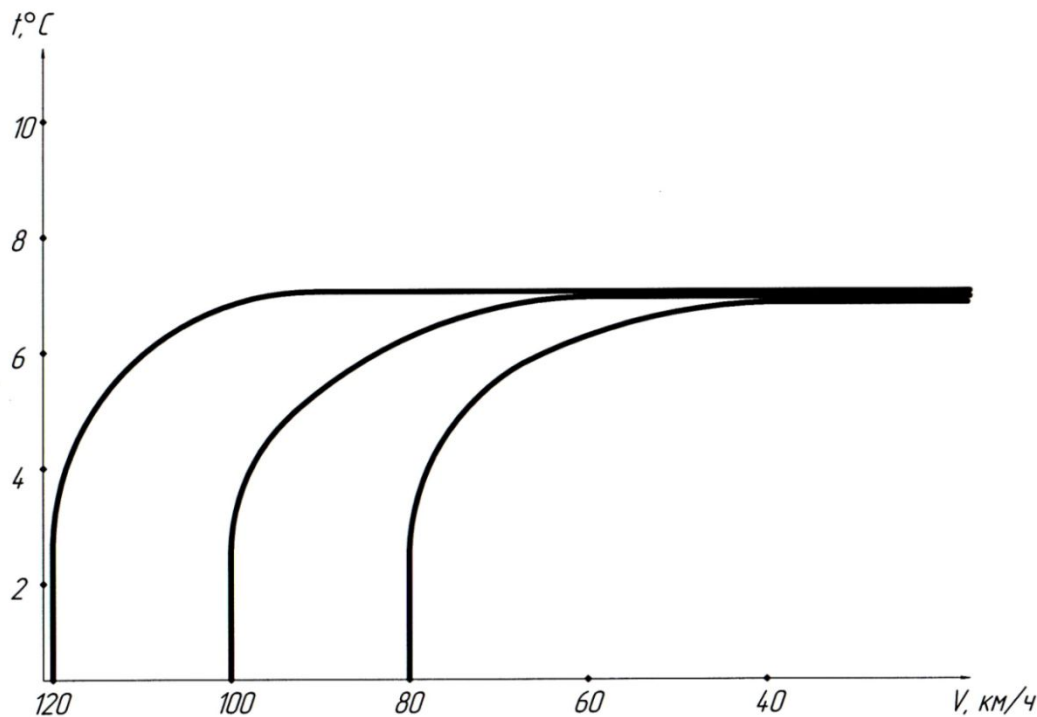
$$\alpha \frac{\partial \theta_0}{\partial x} = \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial x^2}$$
$$\frac{\partial \theta_0(0, x)}{\partial y} = \begin{cases} -q(x), x \in [0, \delta] \\ \mu \theta_{ср.}, x \in (\delta, 2\pi) \end{cases}$$

$$\theta_{ср.} = \frac{\theta_{-1}}{\mu} = \frac{\int_0^{\delta} q(x) dx}{\mu(2\pi - \delta)}$$

Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Изменение дополнительного нагрева рельсов в зависимости от скорости движения

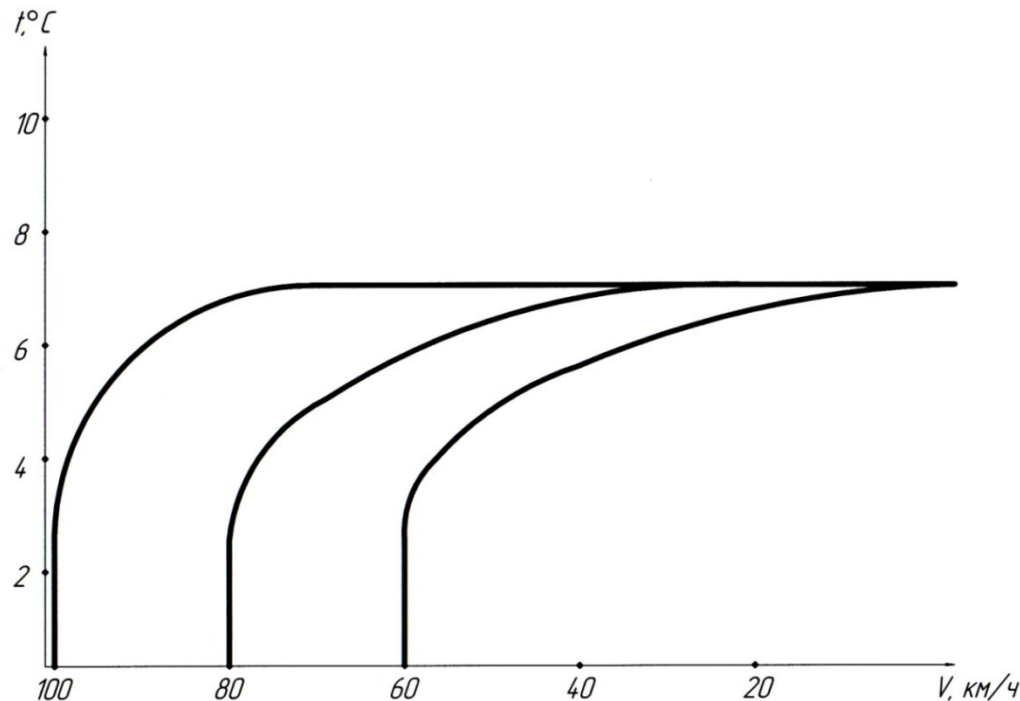
Изменение t в зависимости от скорости поезда ($V_H=120$ км/ч).



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

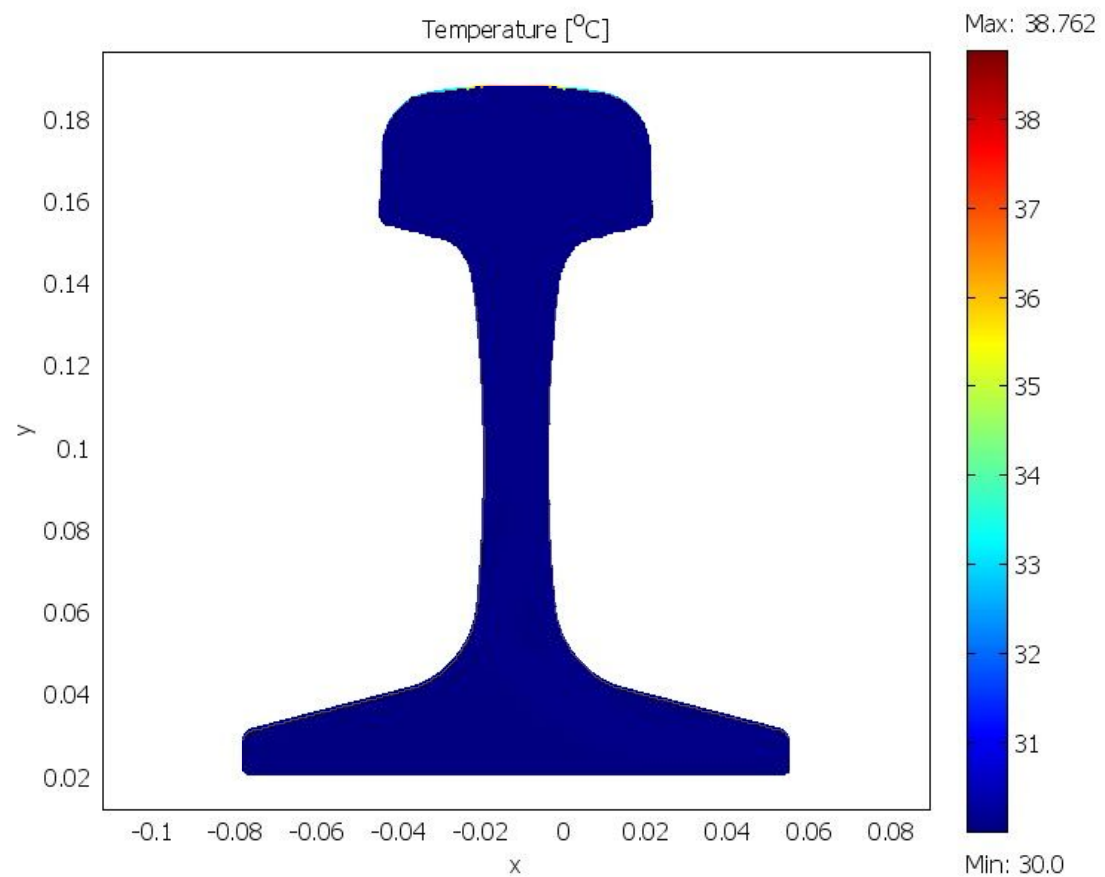
Изменение дополнительного нагрева рельсов в зависимости от скорости движения

График зависимости изменения дополнительных температур в рельсовых плетях ($V_H=100$ км/ч).



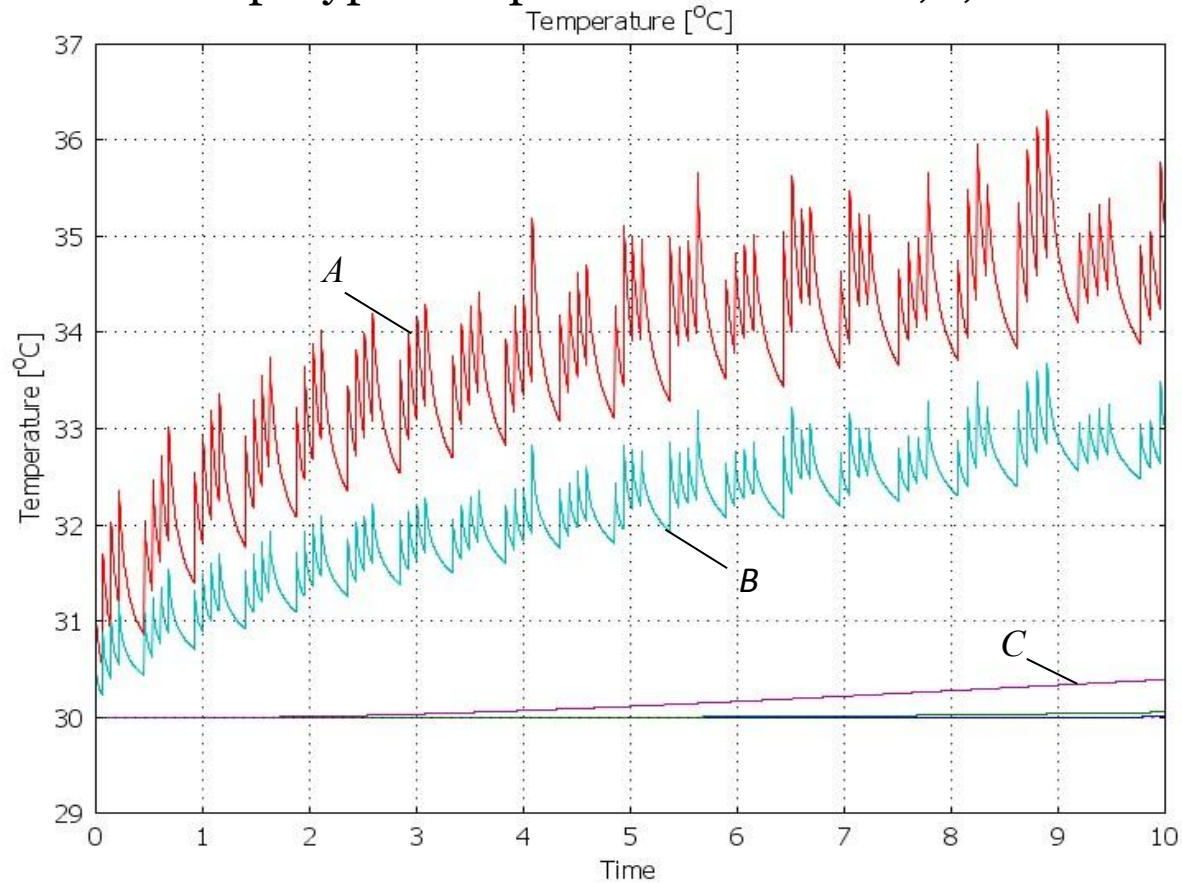
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Изменения температуры рельса от начальной температуры торможения (30°C)



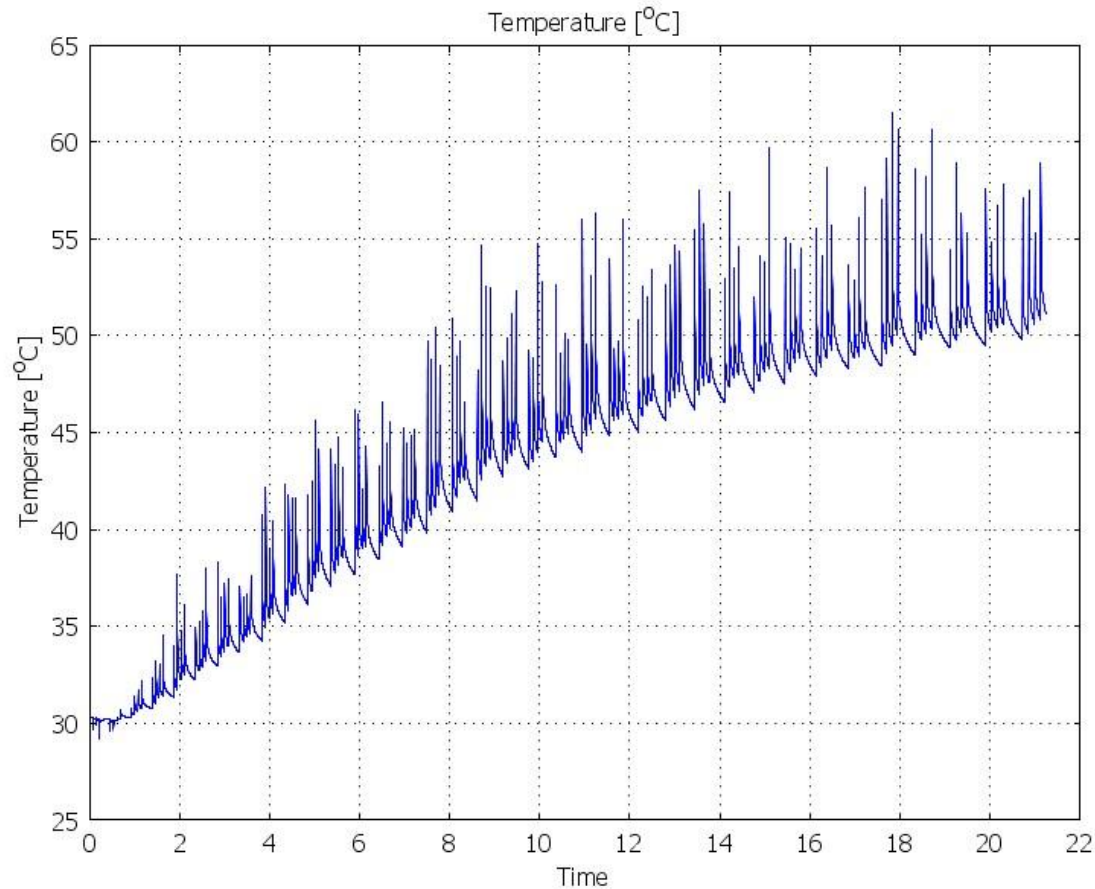
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Изменение температуры во времени в точках А, В, С на головке рельса



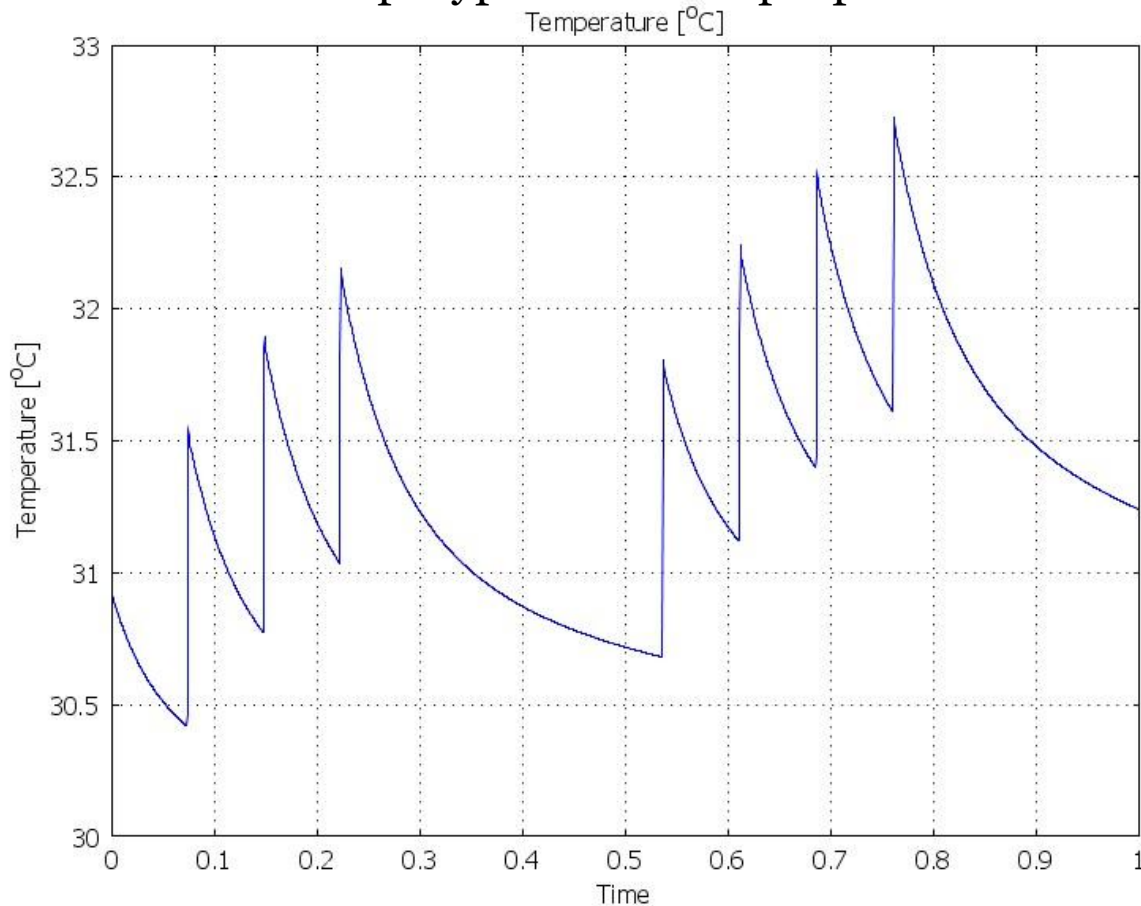
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Местный нагрев рельса на поверхности контакта при прохождении состава



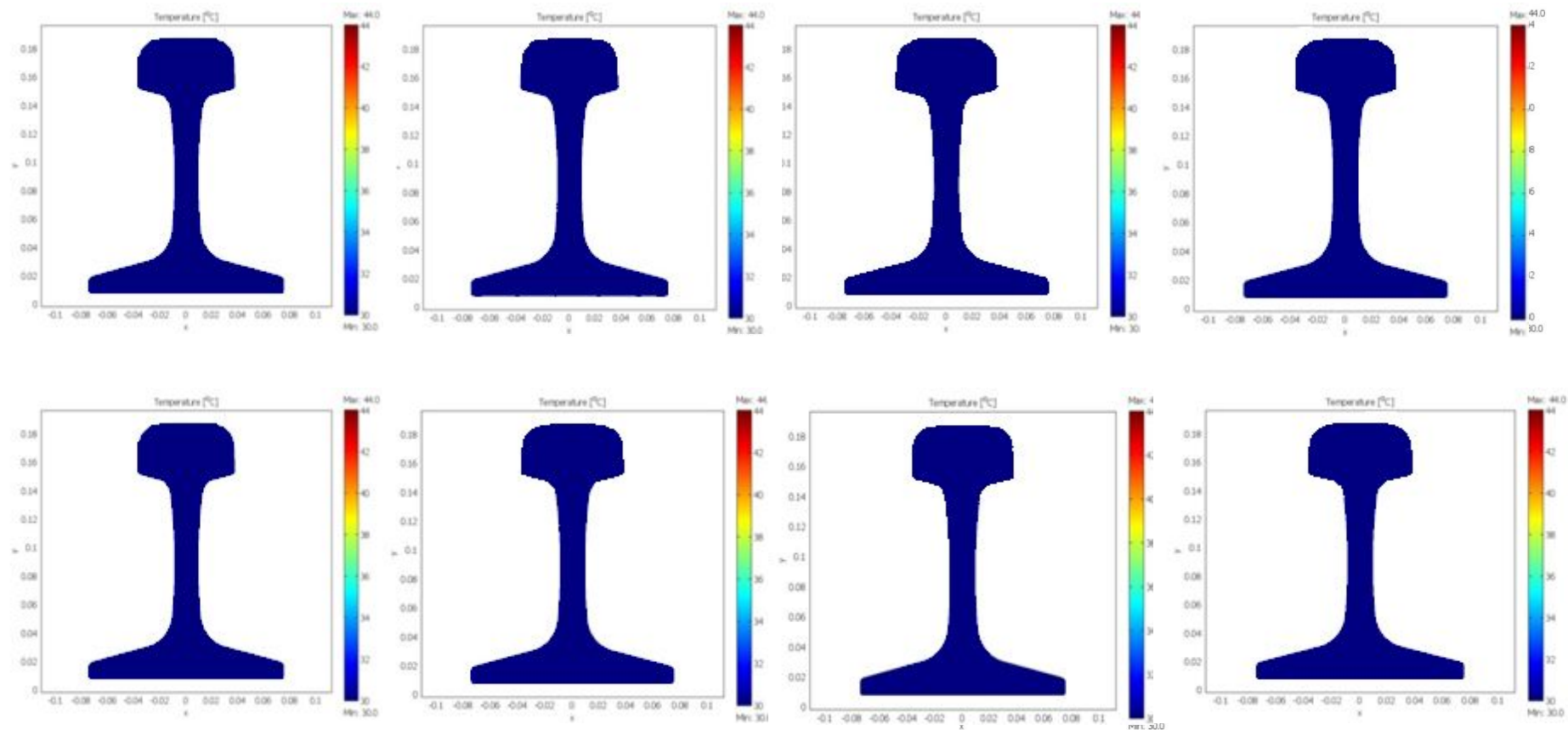
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

График изменения температур с высоким разрешением по времени, точка А



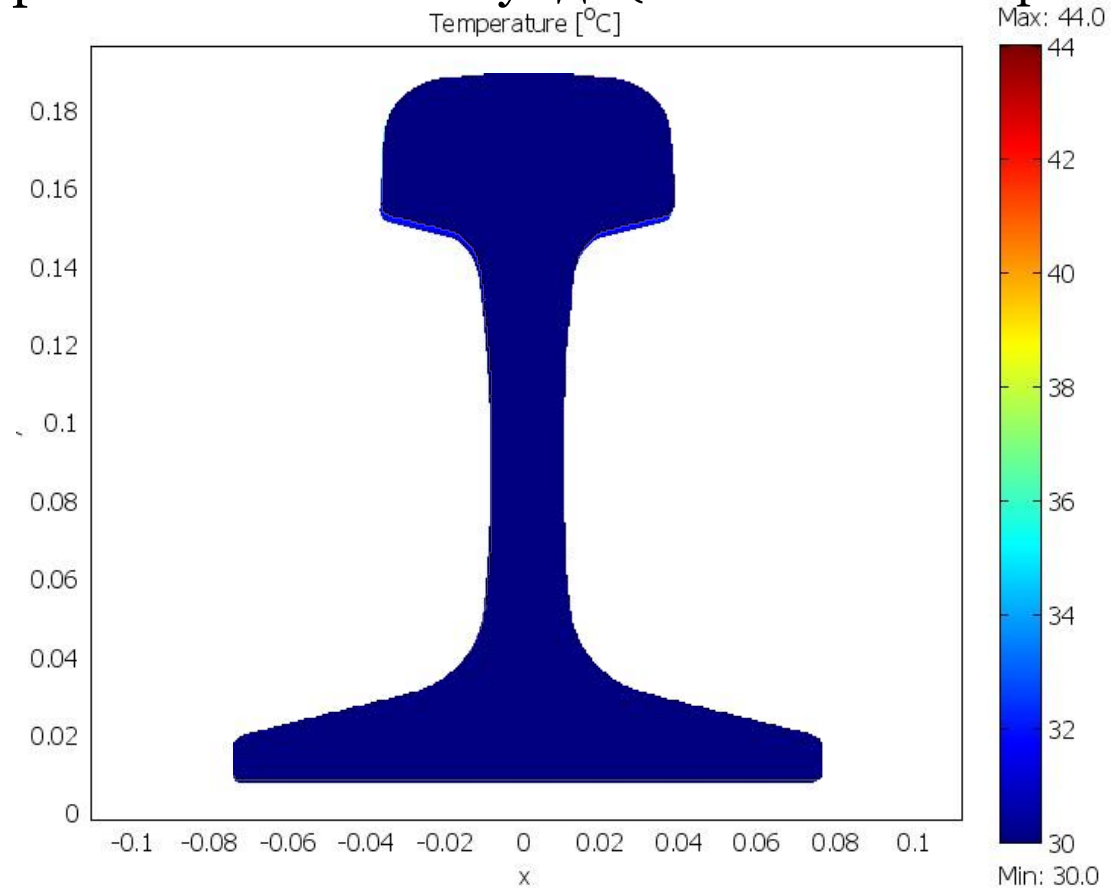
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Поля температур на 4, 12, 20, 28, 36, 44, 52, 60°С



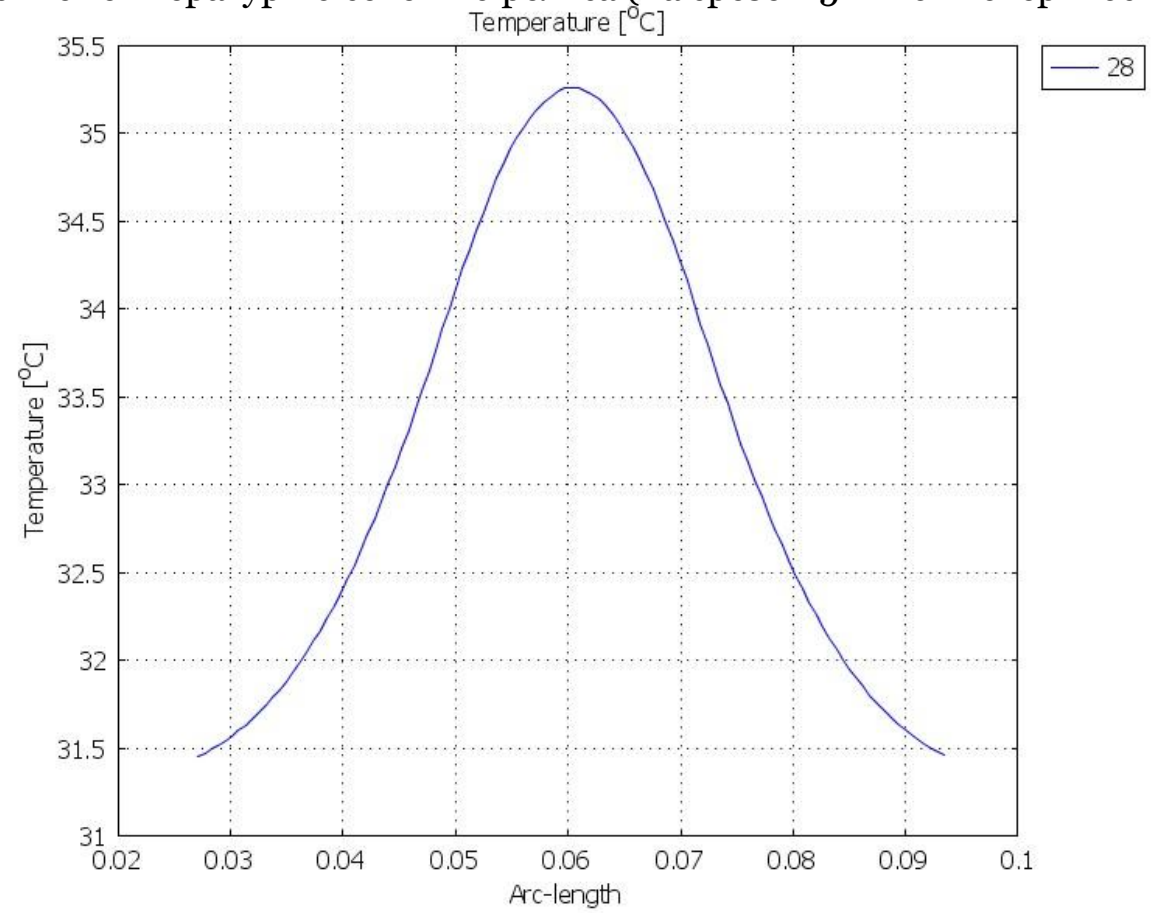
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Температурное поле на 28 секунде (наибольший нагрев головки рельса)



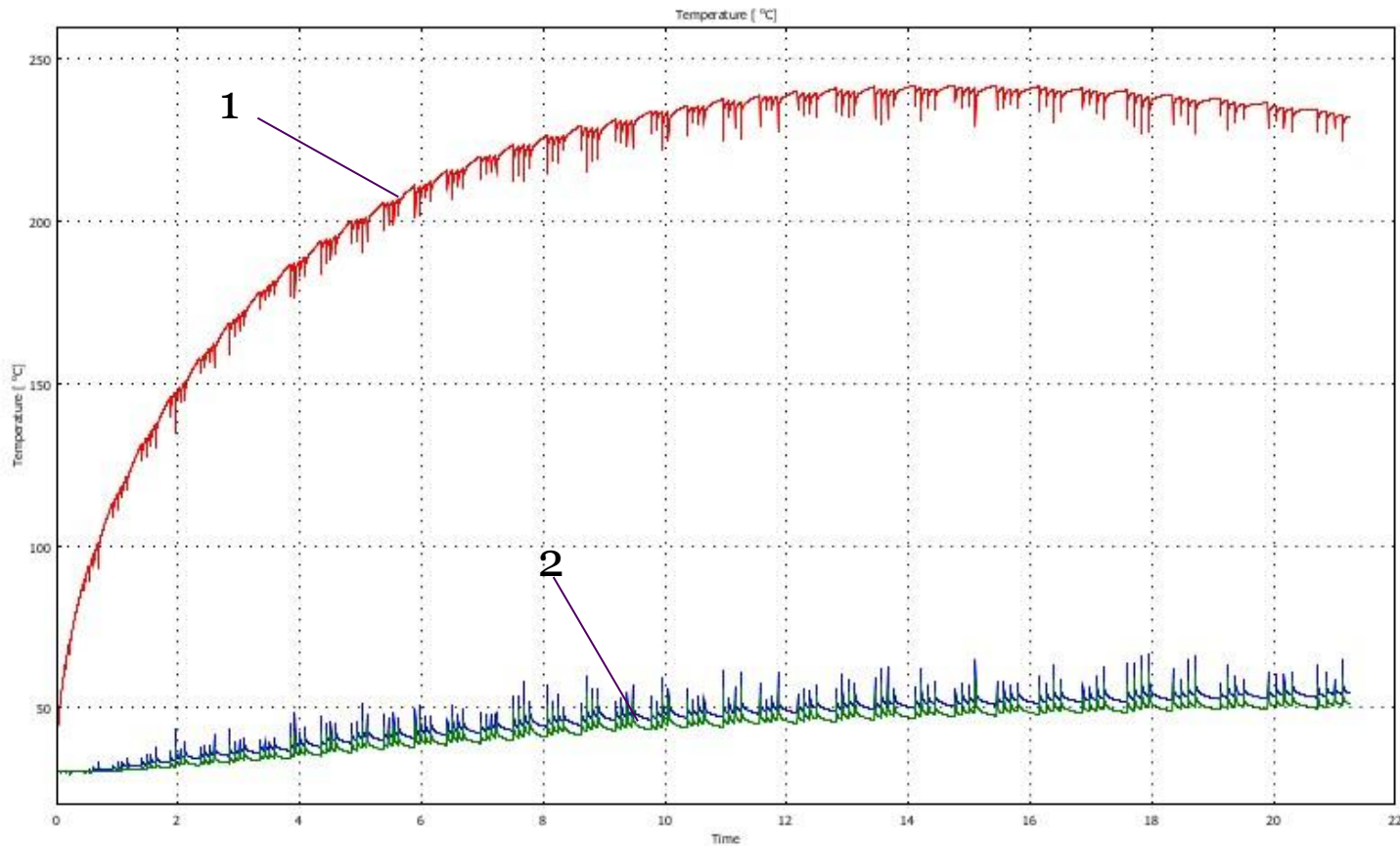
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Распределение температур по сечению рельса (на срезе в 5 мм от поверхности на 28 секунде)



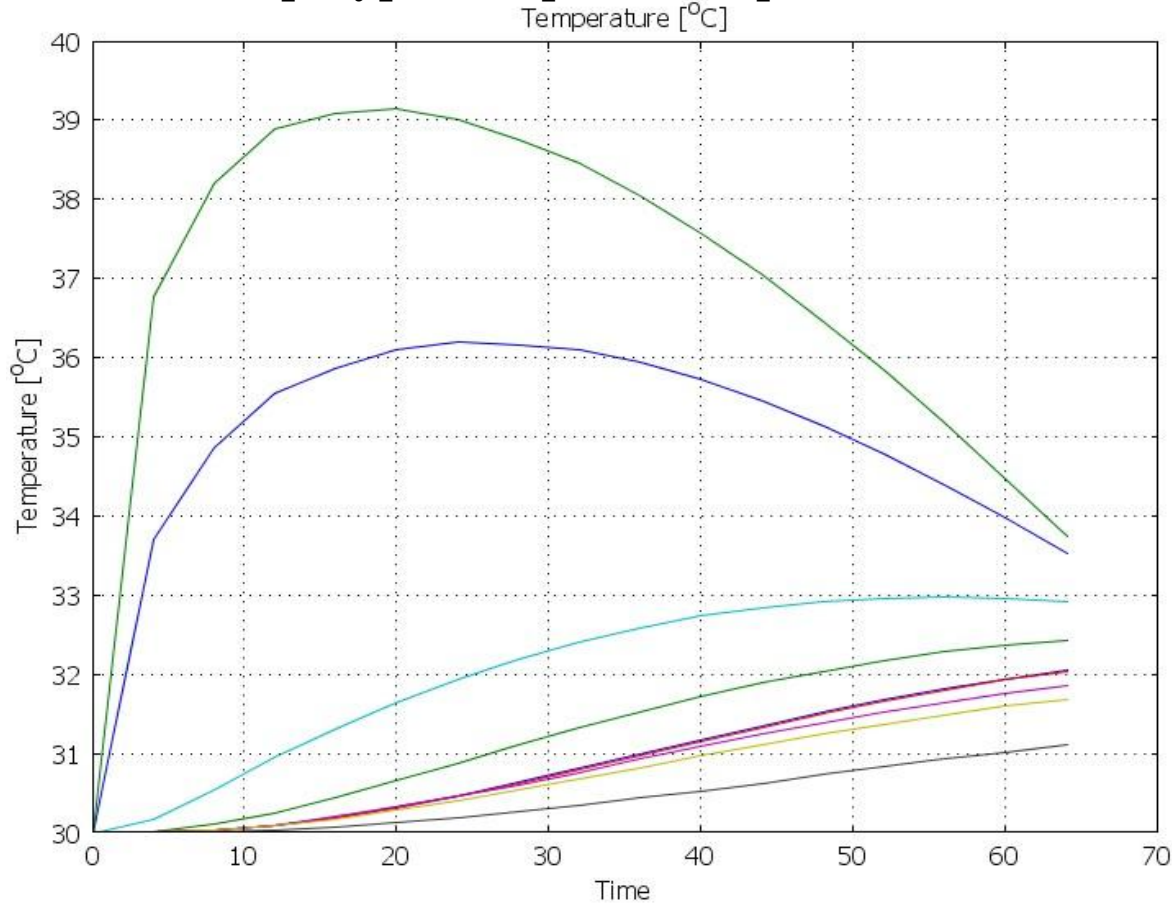
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Изменение температуры в колесе (1) и в рельсе (2) при начальной скорости 90 км/ч



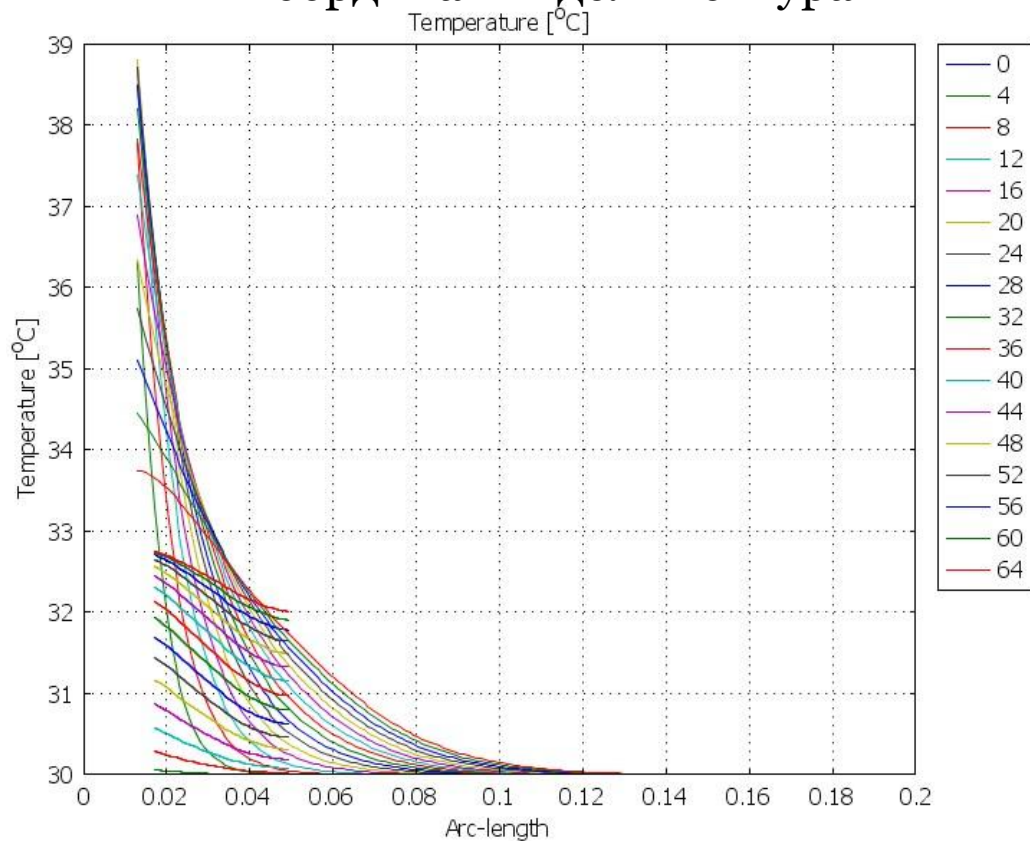
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Изменение температуры во времени в различных точках рельса



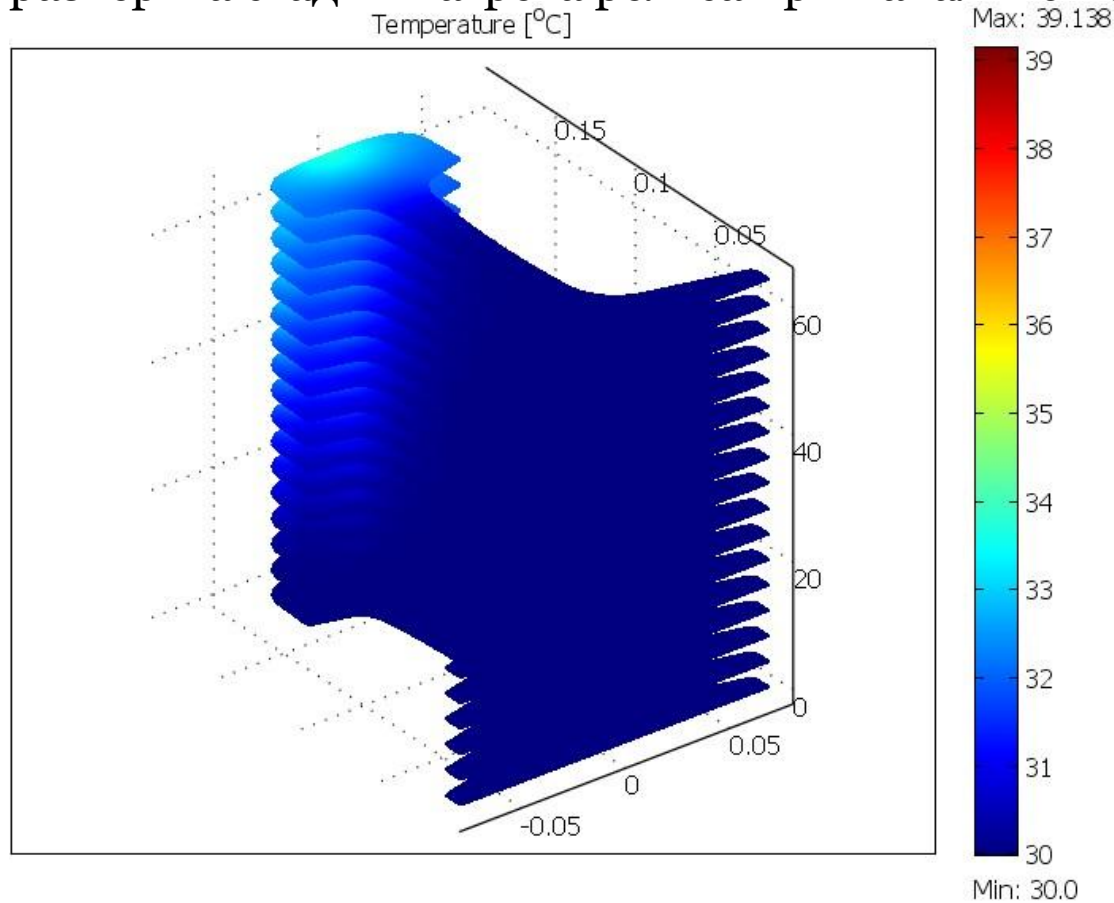
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Температура рельсовой плети в зависимости от времени при торможении состава и координаты вдоль контура



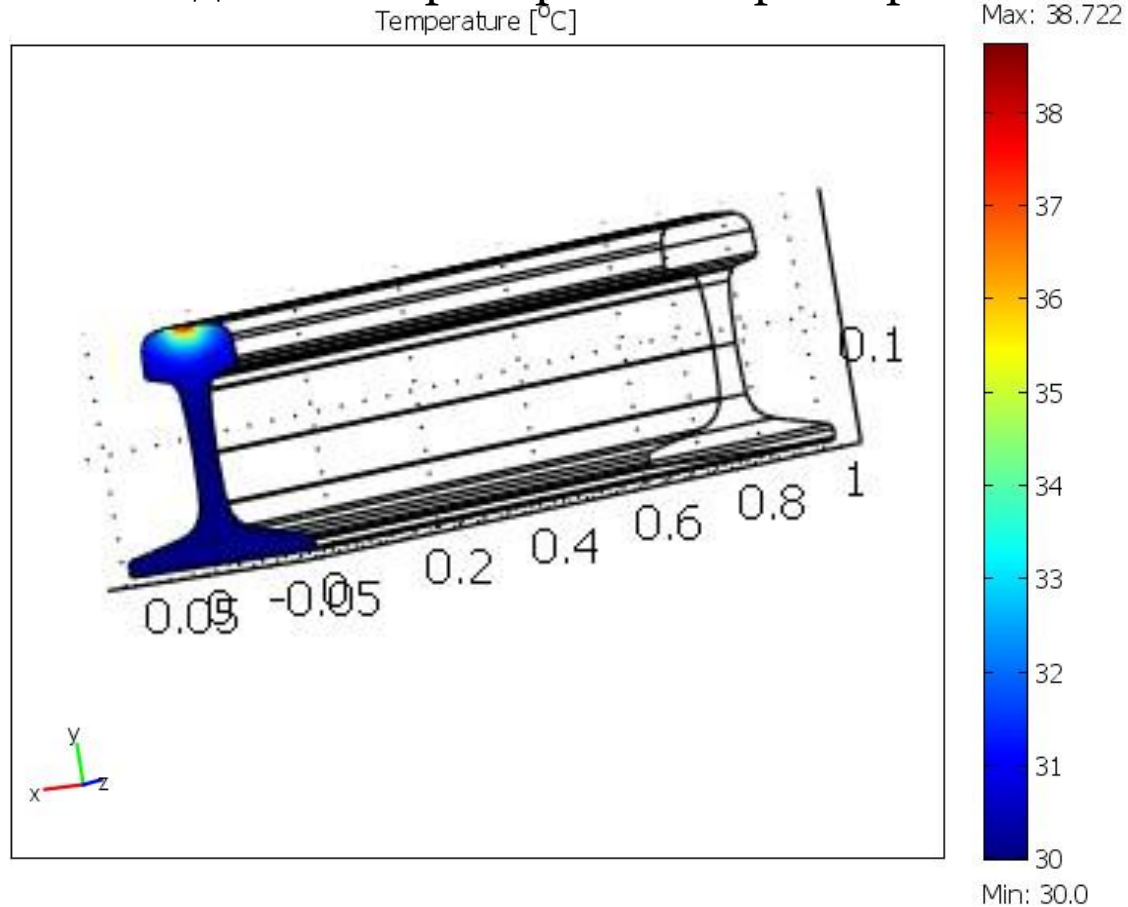
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Посекундная развертка стадий нагрева рельса при начальной скорости 90 км/ч



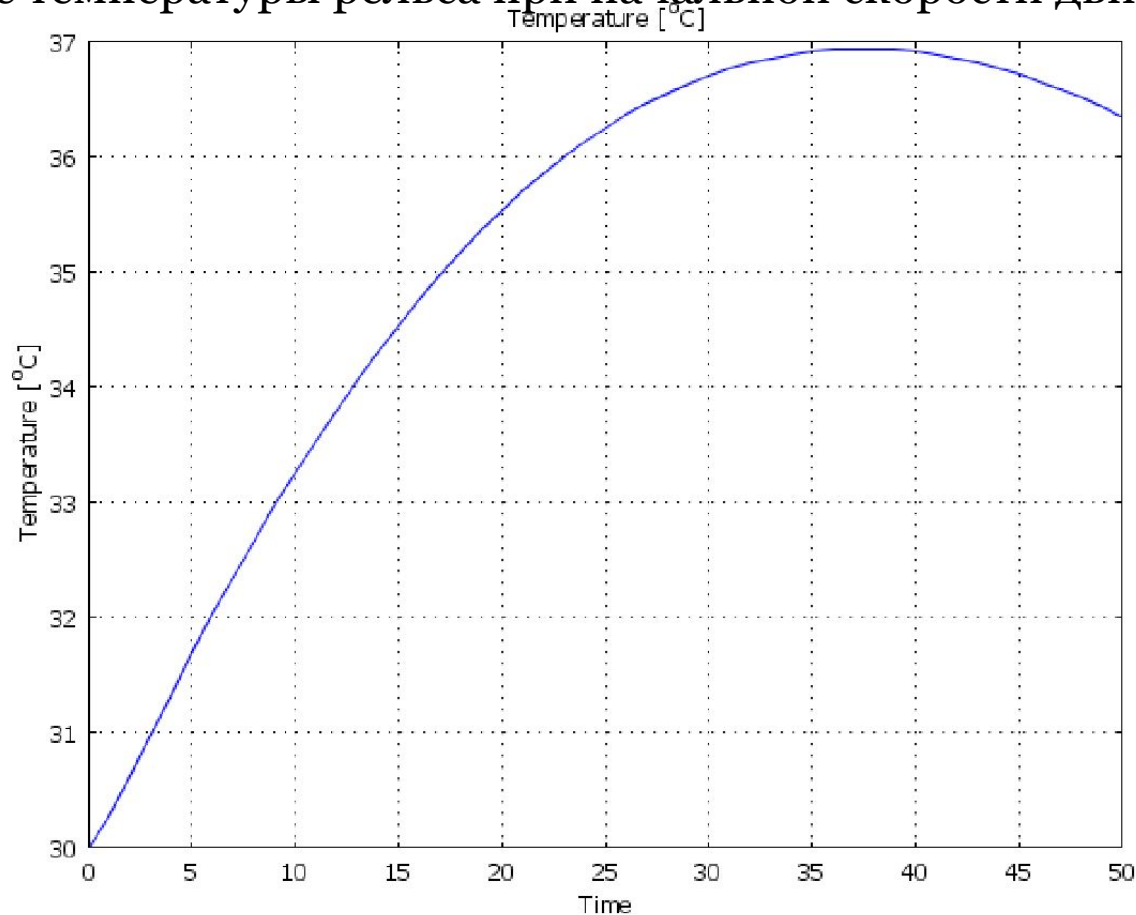
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Решение задачи о нагреве рельса в трехмерной постановке



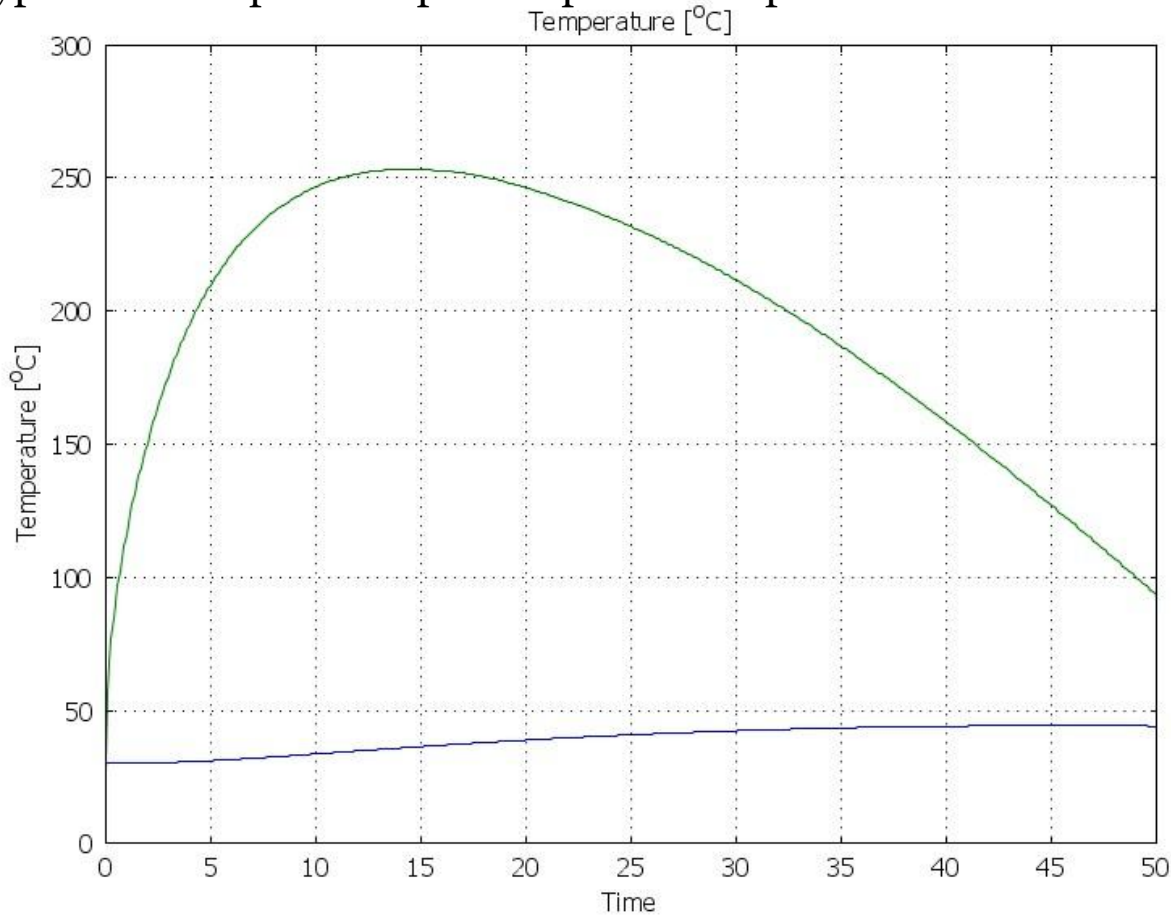
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Изменение температуры рельса при начальной скорости движения 60 км/ч



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Температура колеса и рельса при экстренном торможении в зависимости от времени



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава



Схема расположения датчиков на опытном участке

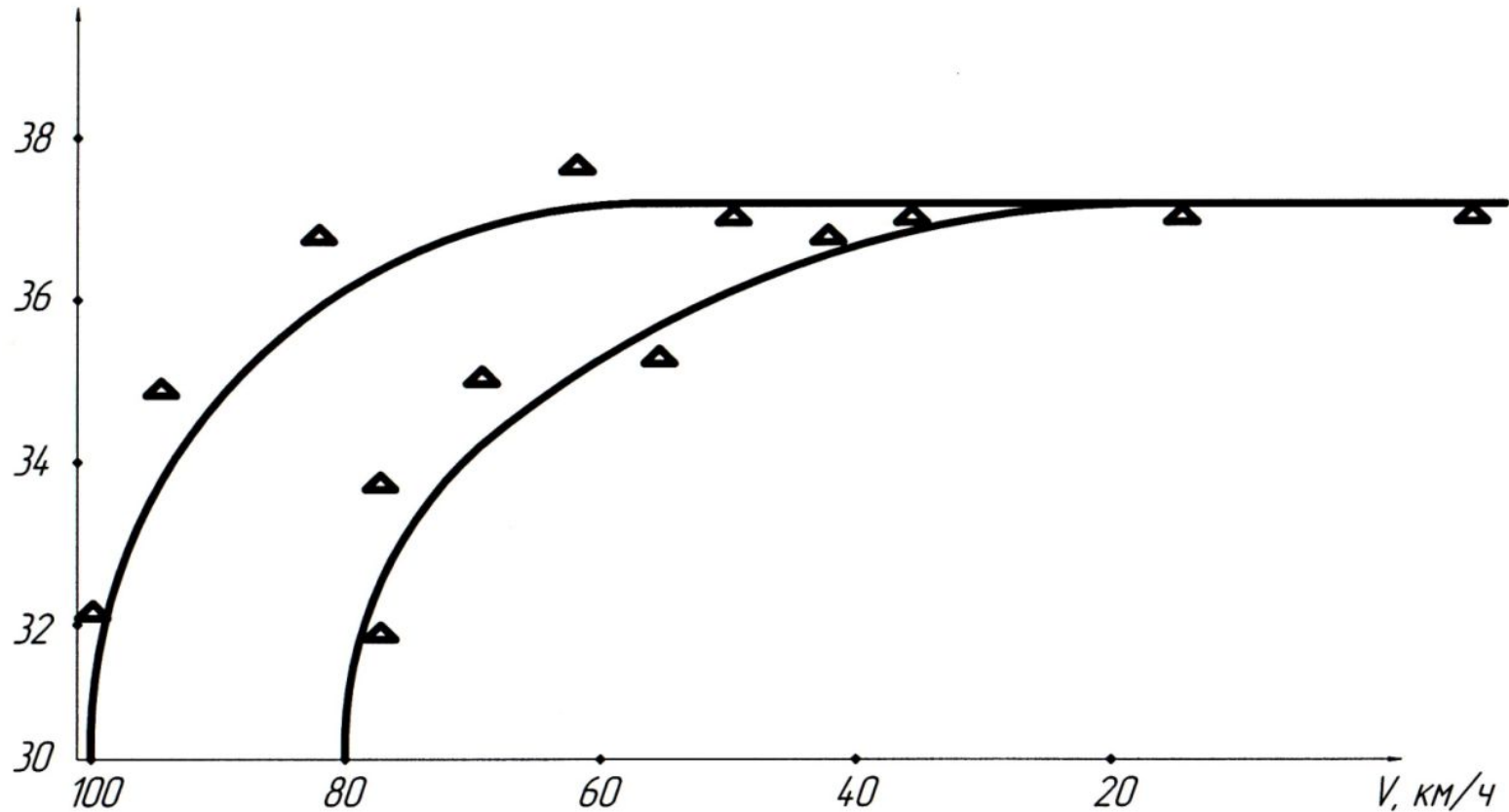
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Характеристики опытных участков

№ п/п	Наименование характеристик	Изм.	№ участка			
			1	2	3	4
1	Длина рельсовых плетей	П.м.	1700	740	1650	2020
2	Температура рельсовых плетей при их закреплении	°С	28	31	30	29
3	Способ удлинения плетей	-	предв.изгиб	-	предв.изгиб	предв.изгиб
4	Грузонапряженность	Млн.ткм бр.в год	31	31	31	31
5	Пропущенный тоннаж	-//-	190	190	190	190
6	Тип верхнего строения	-	тяжел.	тяжел.	тяжел.	тяжел.
7	Тип обращающего локомотива	-	ВЛ10 _у /ЧС4	ВЛ10 _у /ЧС4	ТЭЗ/ТЭП60	ТЭЗ/ТЭП60
8	Скорость поезда	км/ч	80/120	80/120	80/120	80/120
9	План линии	-	прямой участок	кривой участок	прямой участок	кривой участок

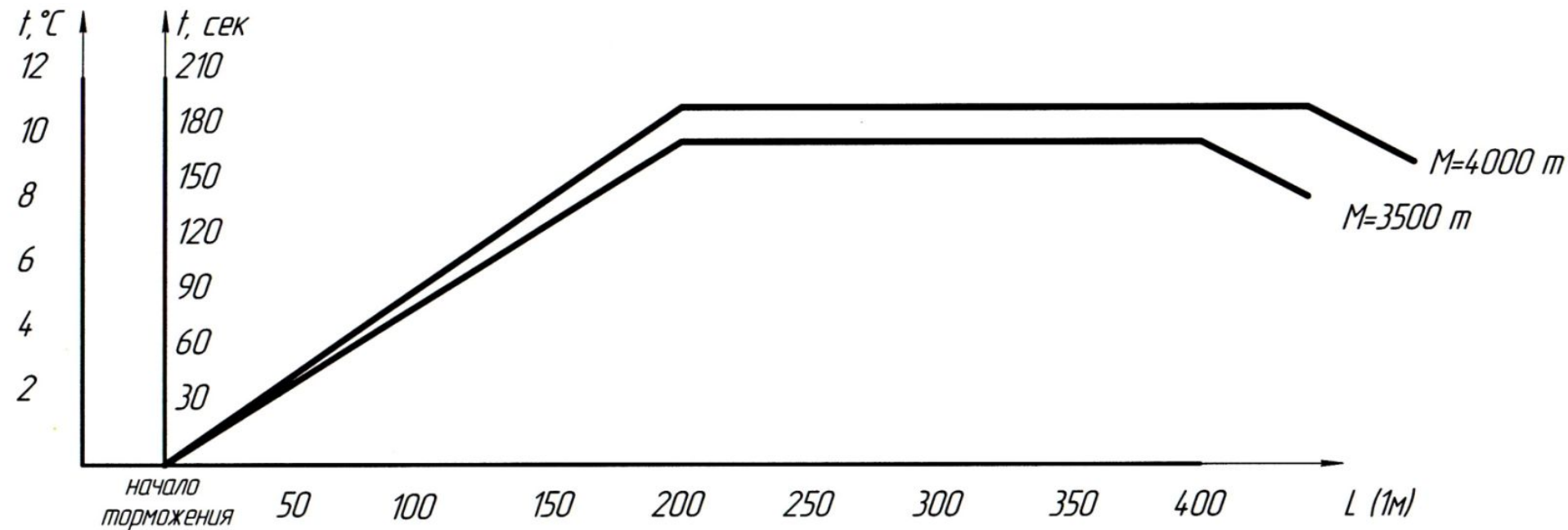
График изменения $t^{\circ}\text{C}$ в рельсовых плетях (прямой участок)

— *экспериментальные данные.*



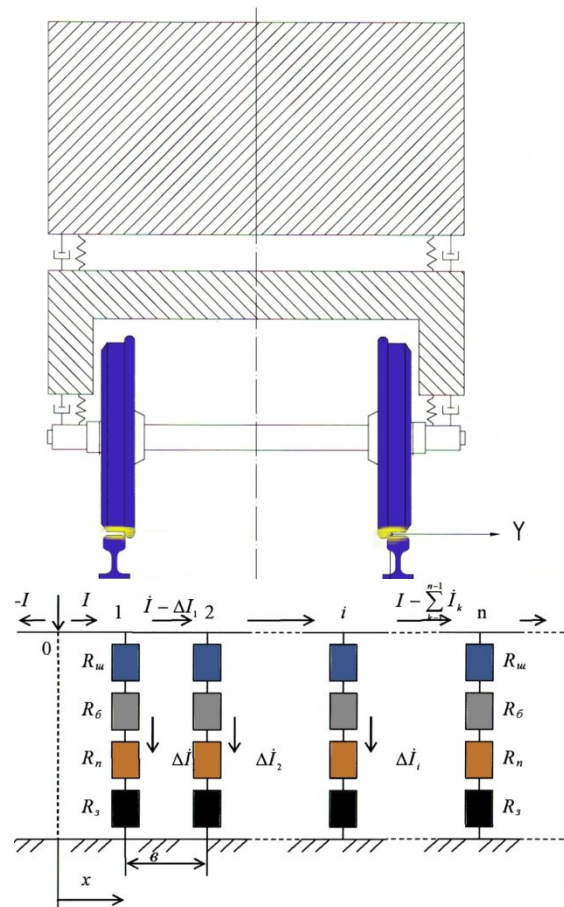
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

Изменение температур в рельсовых плетях при торможении подвижного состава



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия торможения подвижного состава

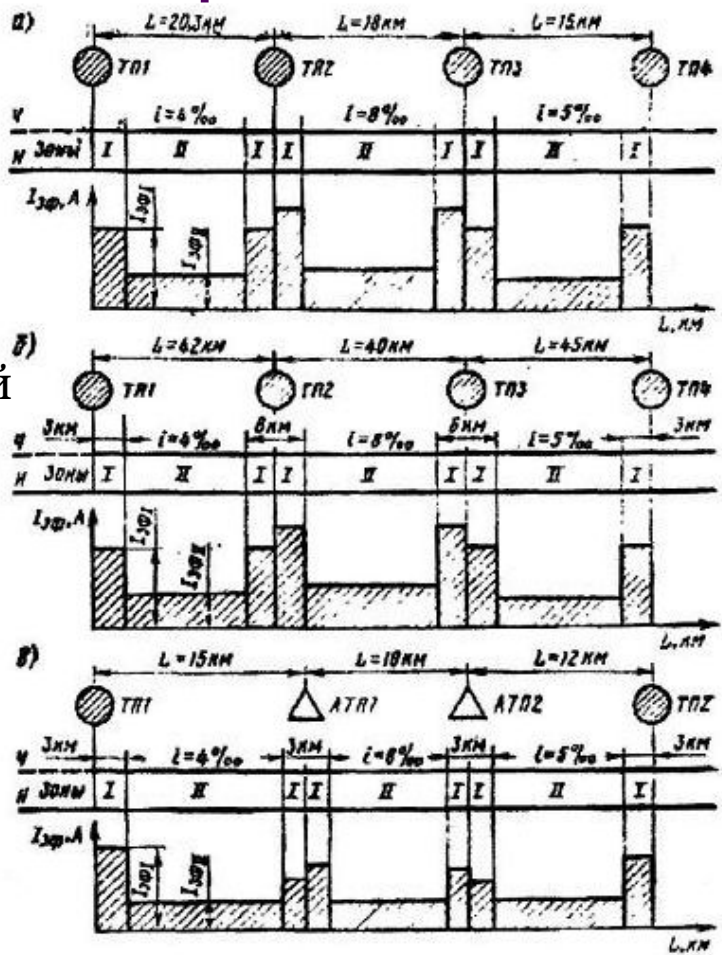
Изменение $\Delta t^{\circ}\text{C}$ по сечению рельса (движение состава в режиме торможения)



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

Зоны интенсивности теплового воздействия поездных токов на элементы обратной тяговой сети при электротяге:

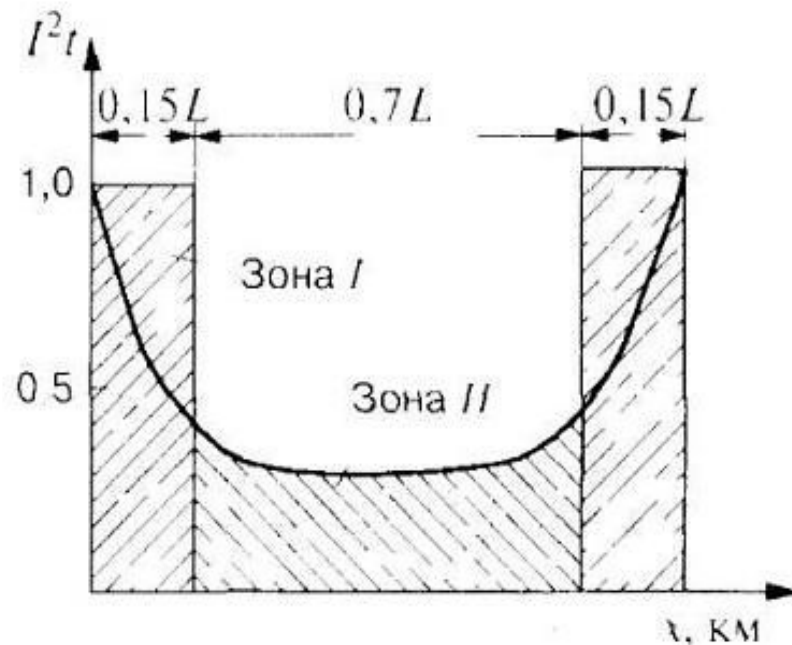
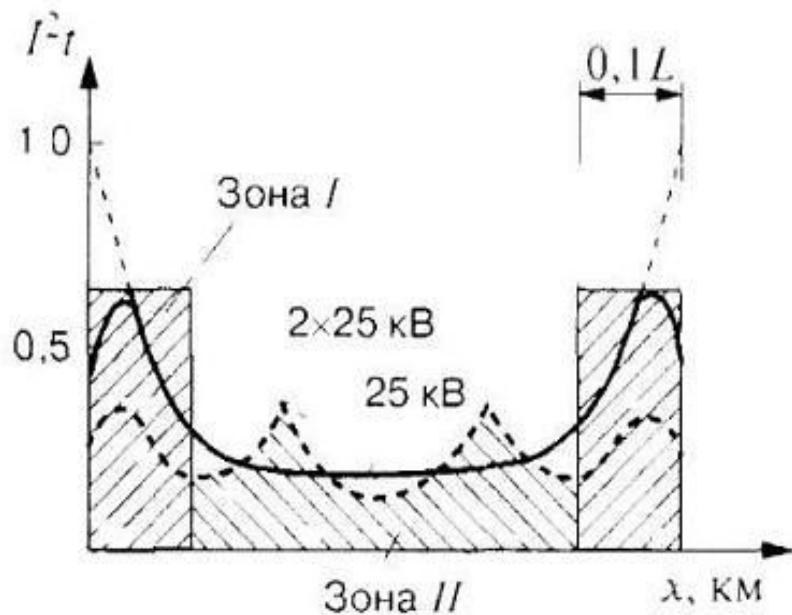
- а) постоянного тока,
- б) переменного тока 25 кВ,
- в) переменного тока 2х25 кВ



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

Изменение по длине участка X тепловой нагрузки от тягового тока I^2t . Выраженной в относительных единицах, на элементы обратной тяговой цепи при электротяге переменного (а) и постоянного (б) тока

б)



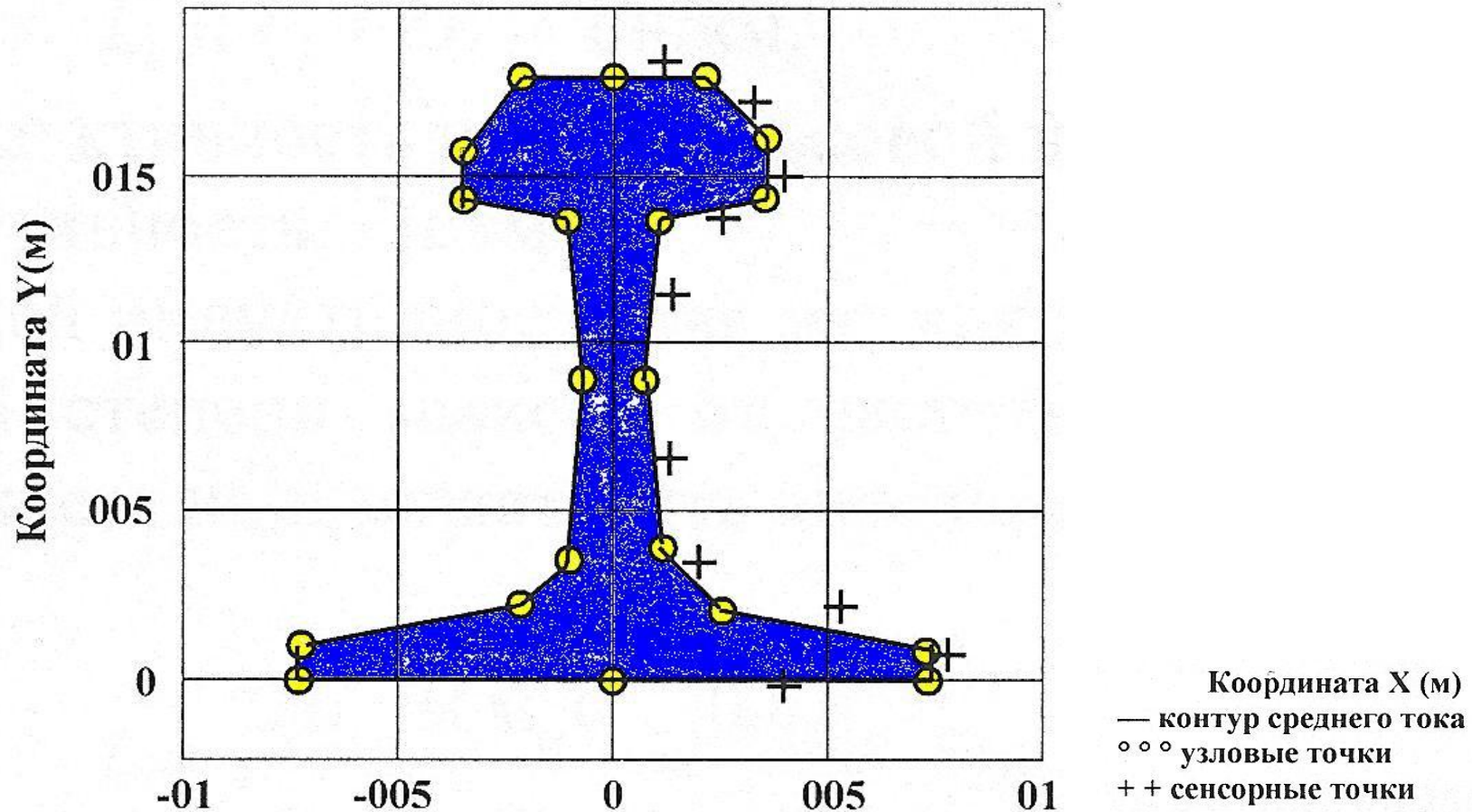
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

Удельное сопротивление рельсовой плети

<i>Тип рельса</i>	<i>Площадь сечения S, см²</i>	<i>Удельное сопротивление одной рельсовой нити постоянному току r_0, Ом/км</i>	<i>Периметр поперечного сечения рельса, см</i>	<i>Эквивалентный радиус круга длинной окружности, равной периметру b, см</i>
<i>P65</i>	<i>82,9</i>	<i>0,0254</i>	<i>70</i>	<i>11,1</i>
<i>P50</i>	<i>64,5</i>	<i>0,0325</i>	<i>62</i>	<i>9,9</i>
<i>P43</i>	<i>55,7</i>	<i>0,0378</i>	<i>57</i>	<i>8,9</i>
<i>P38</i>	<i>49,0</i>	<i>0,0425</i>	<i>55</i>	<i>8,8</i>

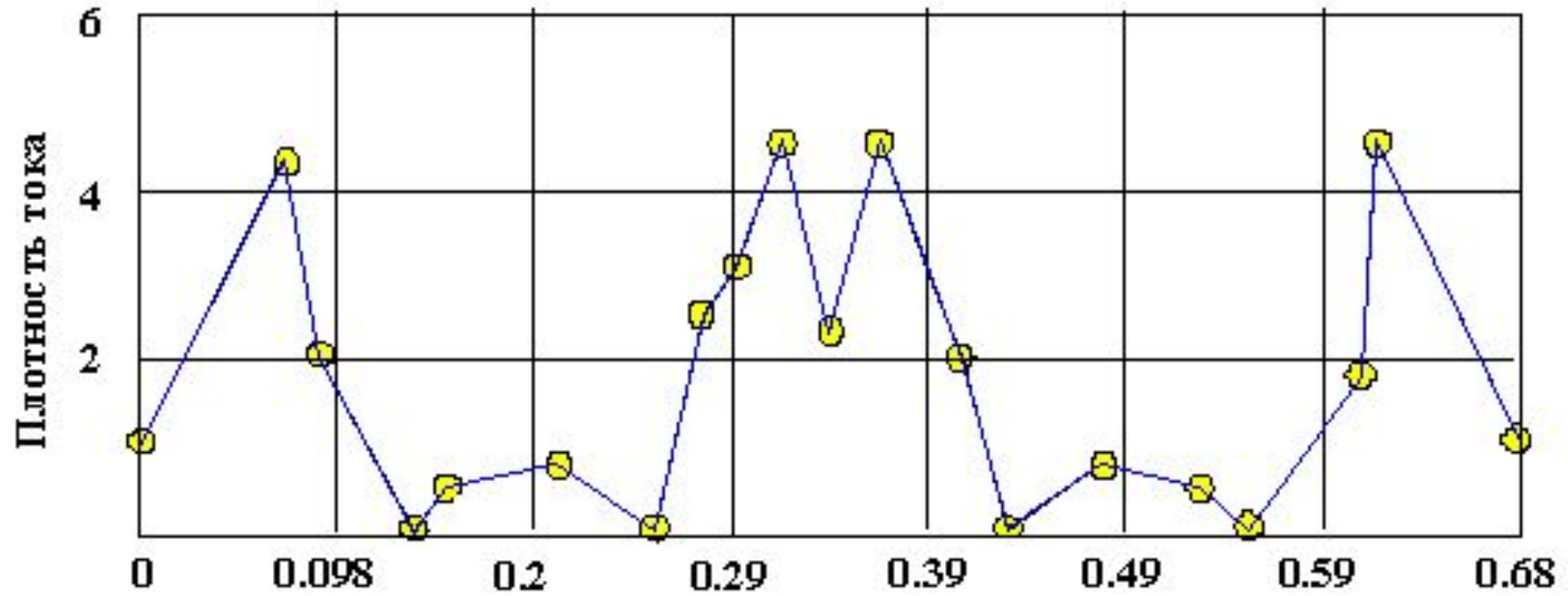
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

Модель кусочно-линейной аппроксимации рельса



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

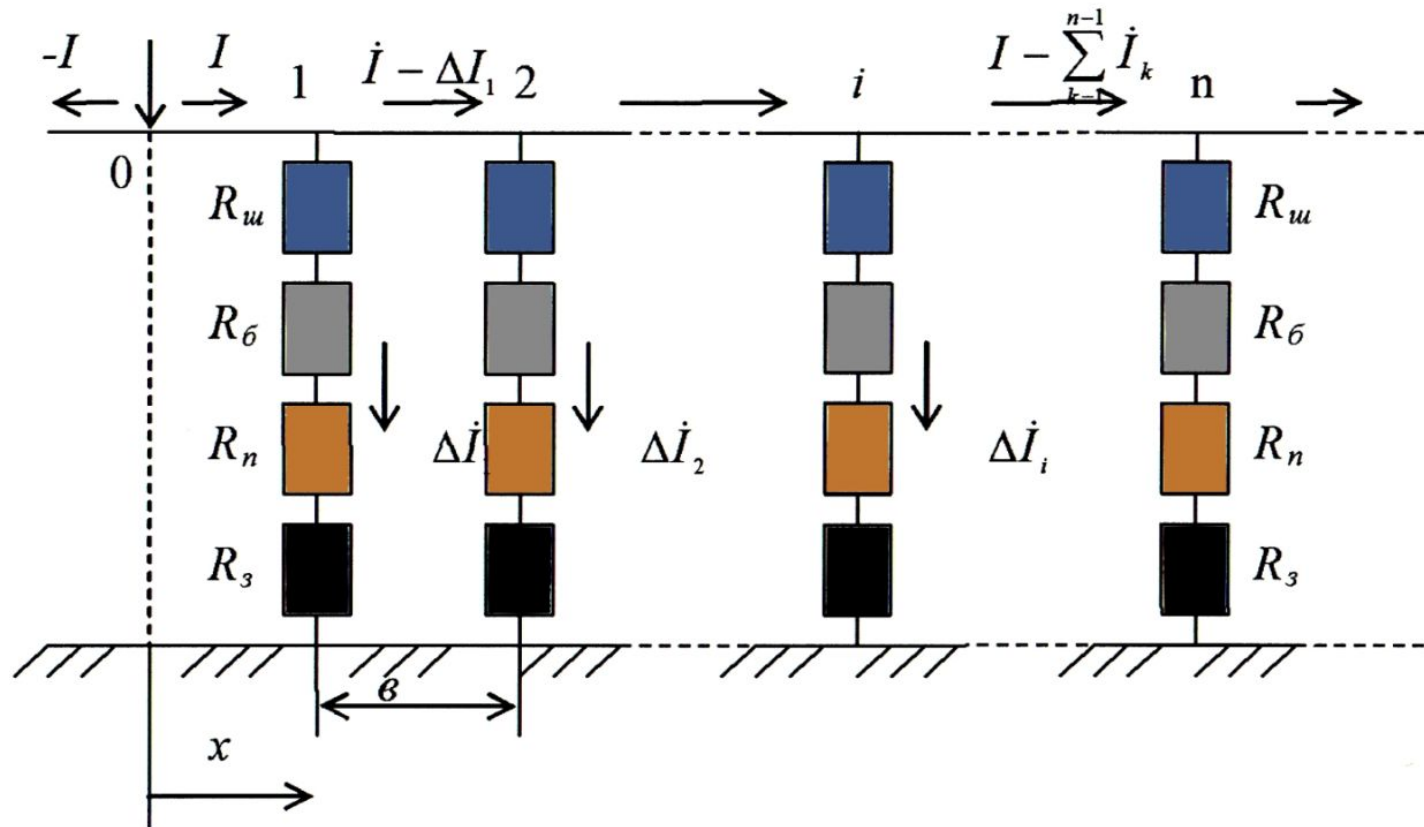
Результаты расчета плотности тока в рельсах



Пространственная координата по периметру

Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

Эквивалентная схема участка рельсовой линии, учитывающая переходные сопротивления



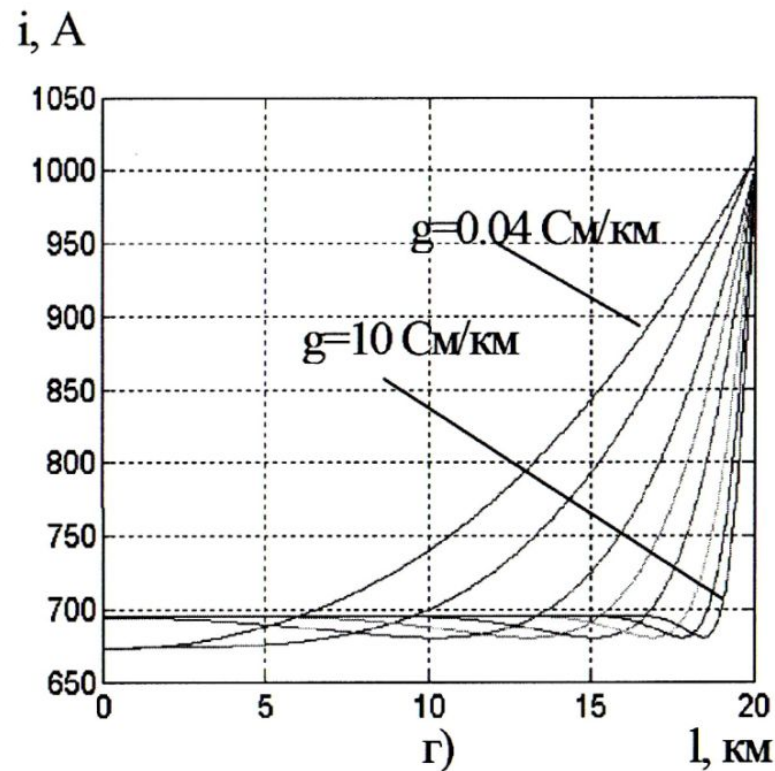
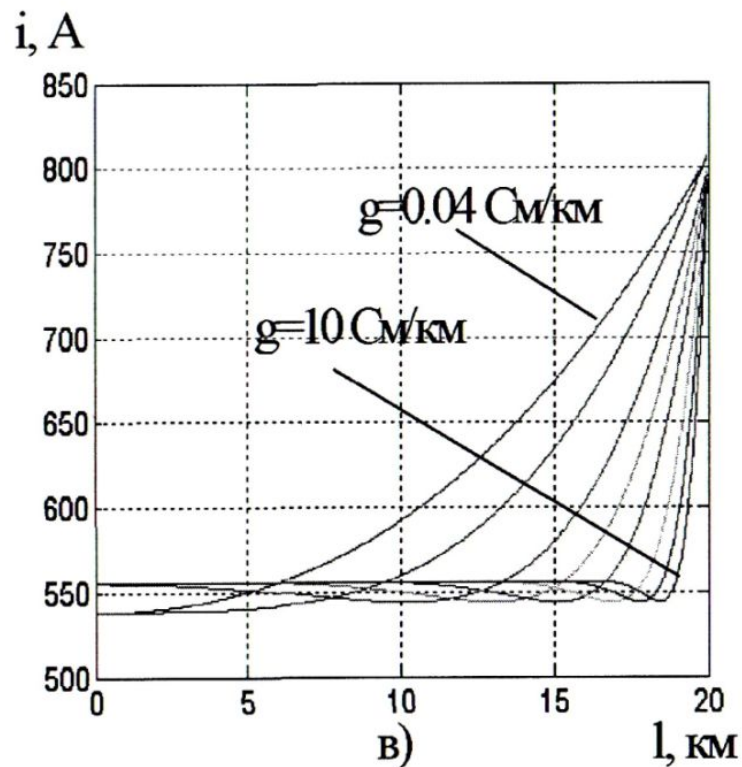
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

Расчетные параметры полного сопротивления рельсов Р65

<i>f</i> , Гц	M_{12}		Z расчетное		Z нормативное		E	
	Модуль, Гн/км	Аргумент	Модуль, Ом/км	Аргумент	Модуль, Ом/км	Аргумент	Модуль	Аргумент
25	135×10^{-5}	$-6^{\circ}40$	0,45	52°	0,5	52°	1,61	$9^{\circ}54$
50	128×10^{-5}	$-7^{\circ}00$	0,68	60°	0,8	65°	1,73	$6^{\circ}10$
75	124×10^{-5}	$-7^{\circ}15$	0,92	64°	1,07	68°	1,76	$5^{\circ}40$
125	119×10^{-5}	$-7^{\circ}35$	1,39	68°	1,53	70°	1,78	$4^{\circ}10$
175	116×10^{-5}	$-7^{\circ}47$	1,8	71°	2,0	75°	1,88	$3^{\circ}40$
225	113×10^{-5}	$-7^{\circ}58$	2,3	73°	2,0	75°	1,85	$2^{\circ}32$
475	$106,3 \times 10^{-5}$	$-8^{\circ}30$	4,5	77°	-	-	1,96	$1^{\circ}40$
725	102×10^{-5}	$-8^{\circ}53$	6,6	80°	-	-	1,96	$0^{\circ}25$
1000	$98,5 \times 10^{-5}$	$-9^{\circ}10$	8,9	81°	-	-	1,94	$-0^{\circ}25$
2000	$91,5 \times 10^{-5}$	$-9^{\circ}54$	17,3	84°	-	-	1,91	$-1^{\circ}25$
3000	-	-	23	85°	-	-	-	-
5000	$83,5 \times 10^{-5}$	$-10^{\circ}55$	42	86°	-	-	1,86	$-2^{\circ}28$

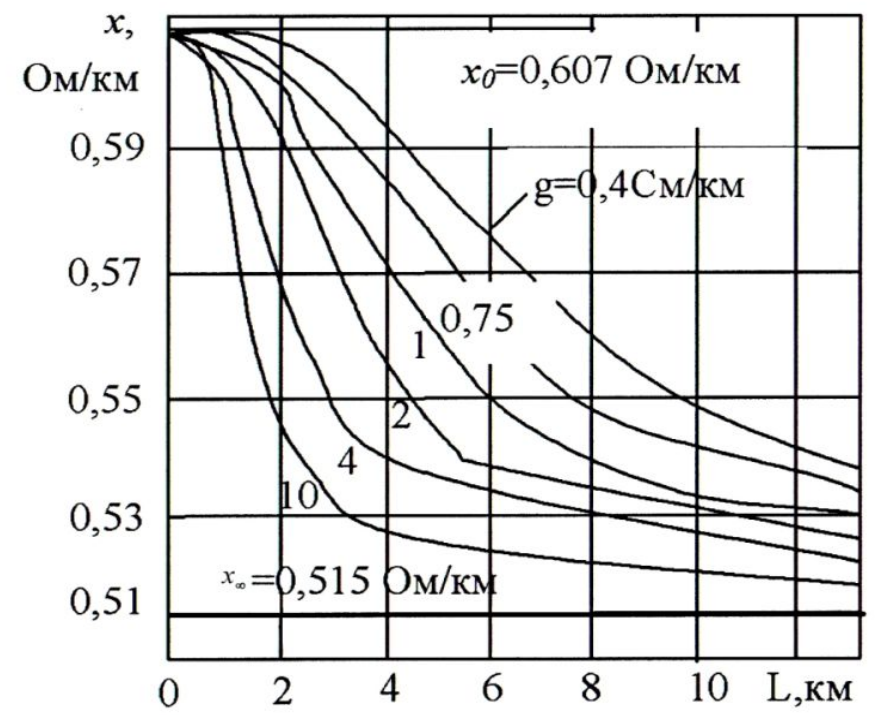
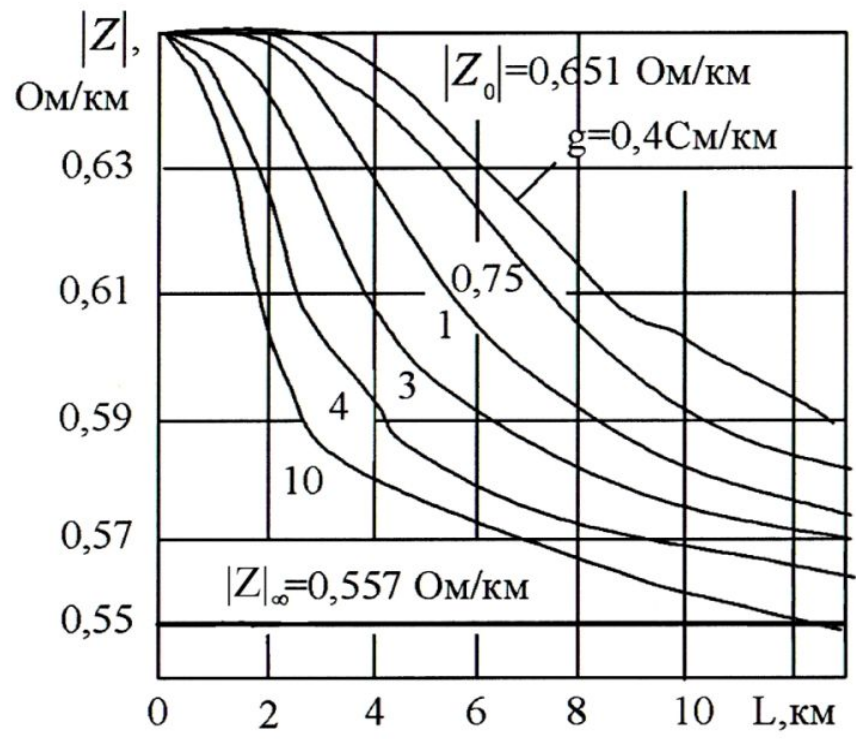
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

Графики изменения величины тягового тока от координаты нахождения электровоза и длины плеча питания тяговой подстанции при различных переходных проводимостях



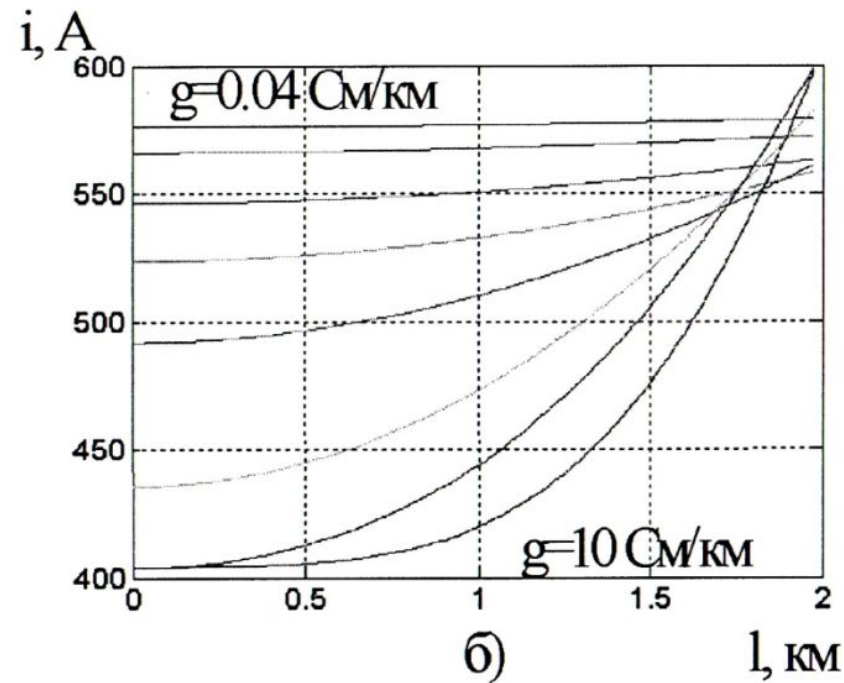
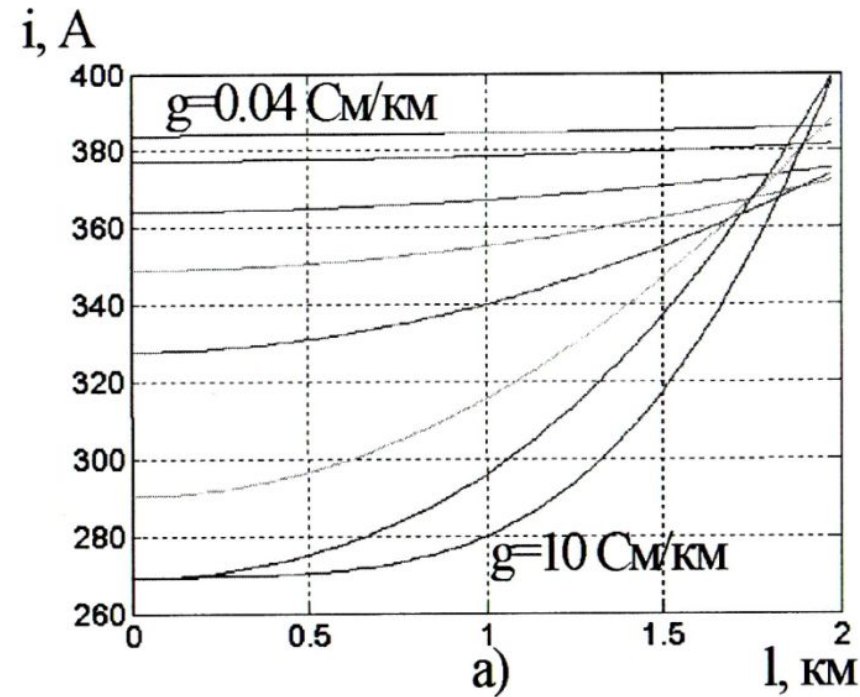
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

Зависимость сопротивлений тяговой сети (а) и (б) от плеча питания



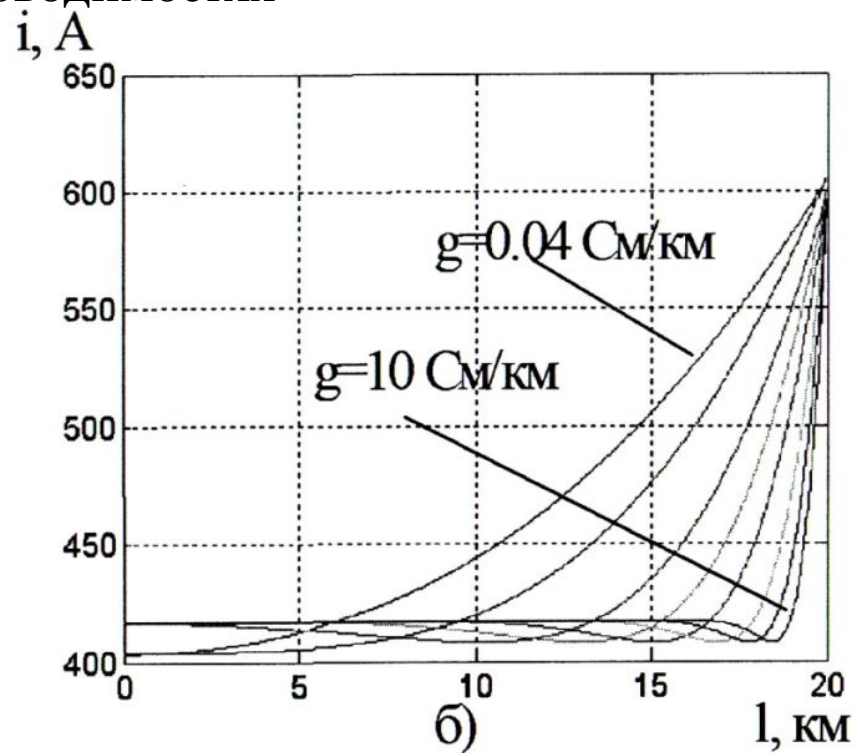
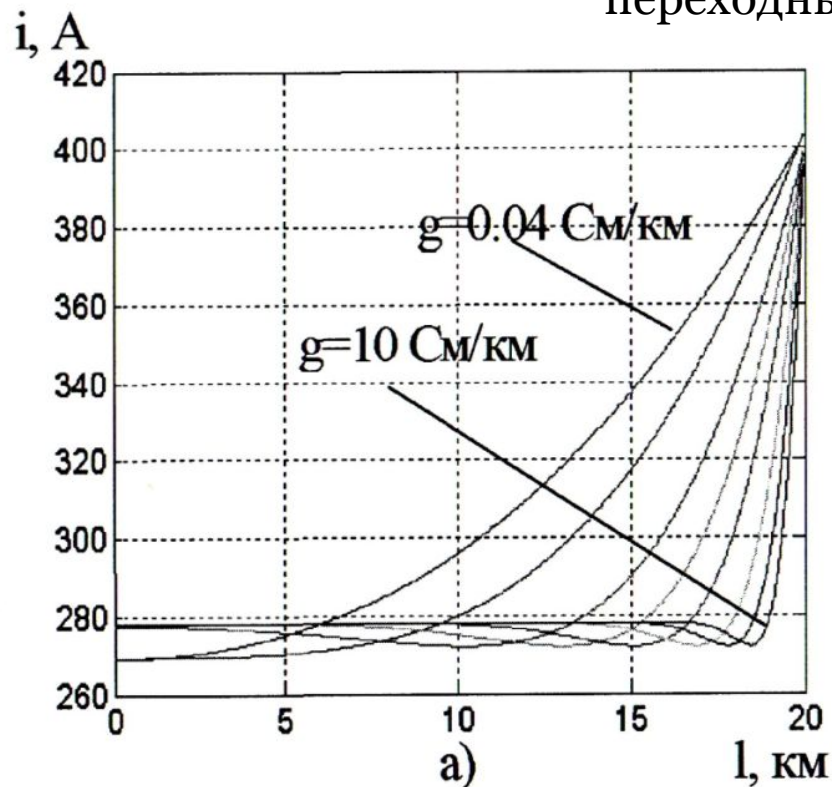
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

Графики изменения величины тягового тока от координаты электровоза при различных переходных проводимостях в ближней в тяговой подстанции зоне



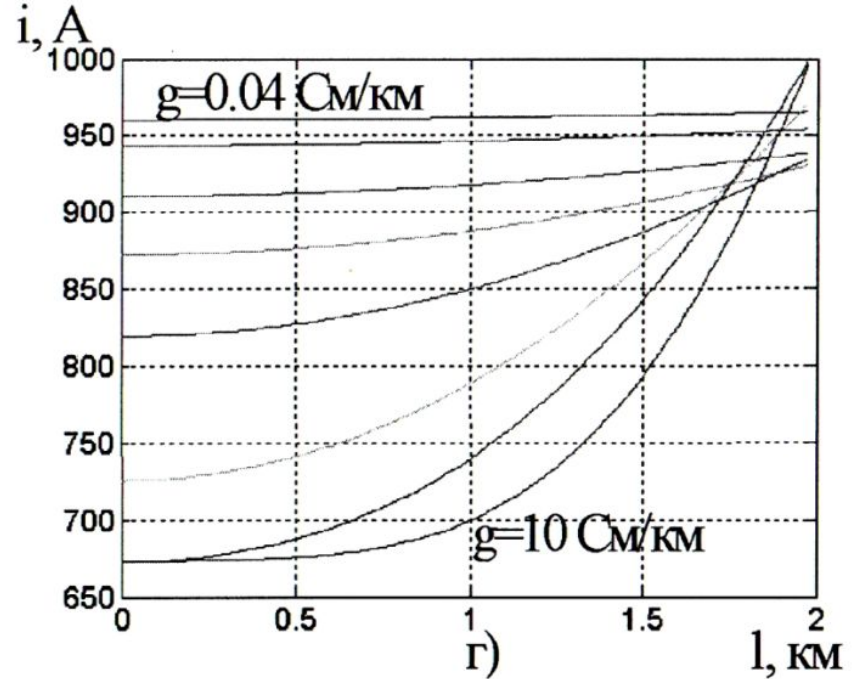
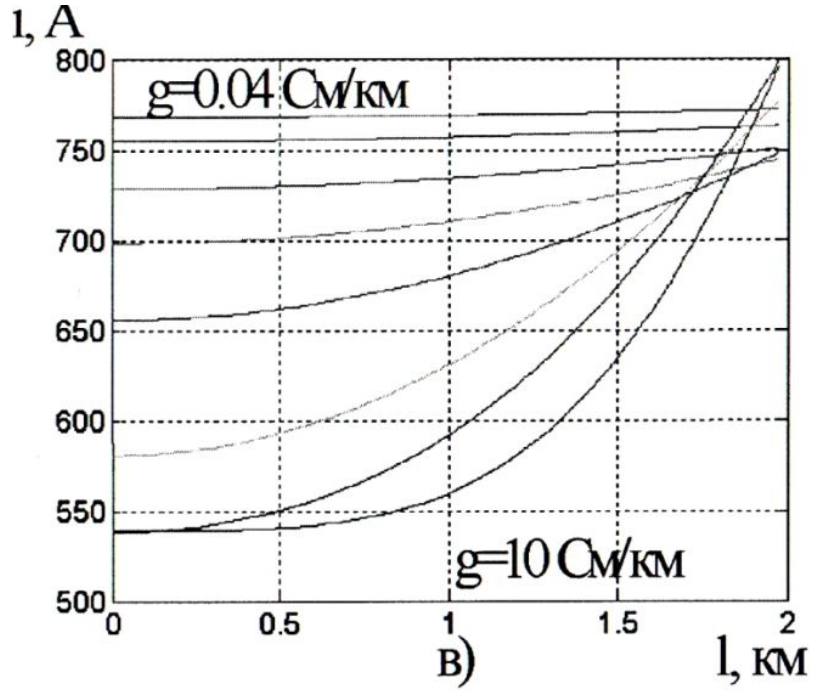
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

Графики изменения величины тягового тока от координаты нахождения электровоза и длины плеча питания тяговой подстанции при различных переходных проводимостях



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

Графики изменения величины тягового тока от координаты электровоза при различных переходных проводимостях в ближней в тяговой подстанции зоне



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов. Окончательная величина зависимости для определения величины нагрева рельсовых плетей от воздействия тягового тока

\mathcal{Q}_t – дополнительный нагрев рельсовой плети от протекания в ней тягового тока

$$\mathcal{Q}_t = \frac{I^2 R_0}{k - I^2 R_0 \alpha} \left[1 - e^{-(t/C)(k - I^2 R_0 \alpha)} \right] + \mathcal{Q}_0 e^{-(t/C)(k - I^2 R_0 \alpha)}$$

$$\mathcal{Q}_t = \frac{I^2 R_0}{k} \left(1 - e^{-t/C/k} \right) + \mathcal{Q}_0 e^{-t/C/k}.$$

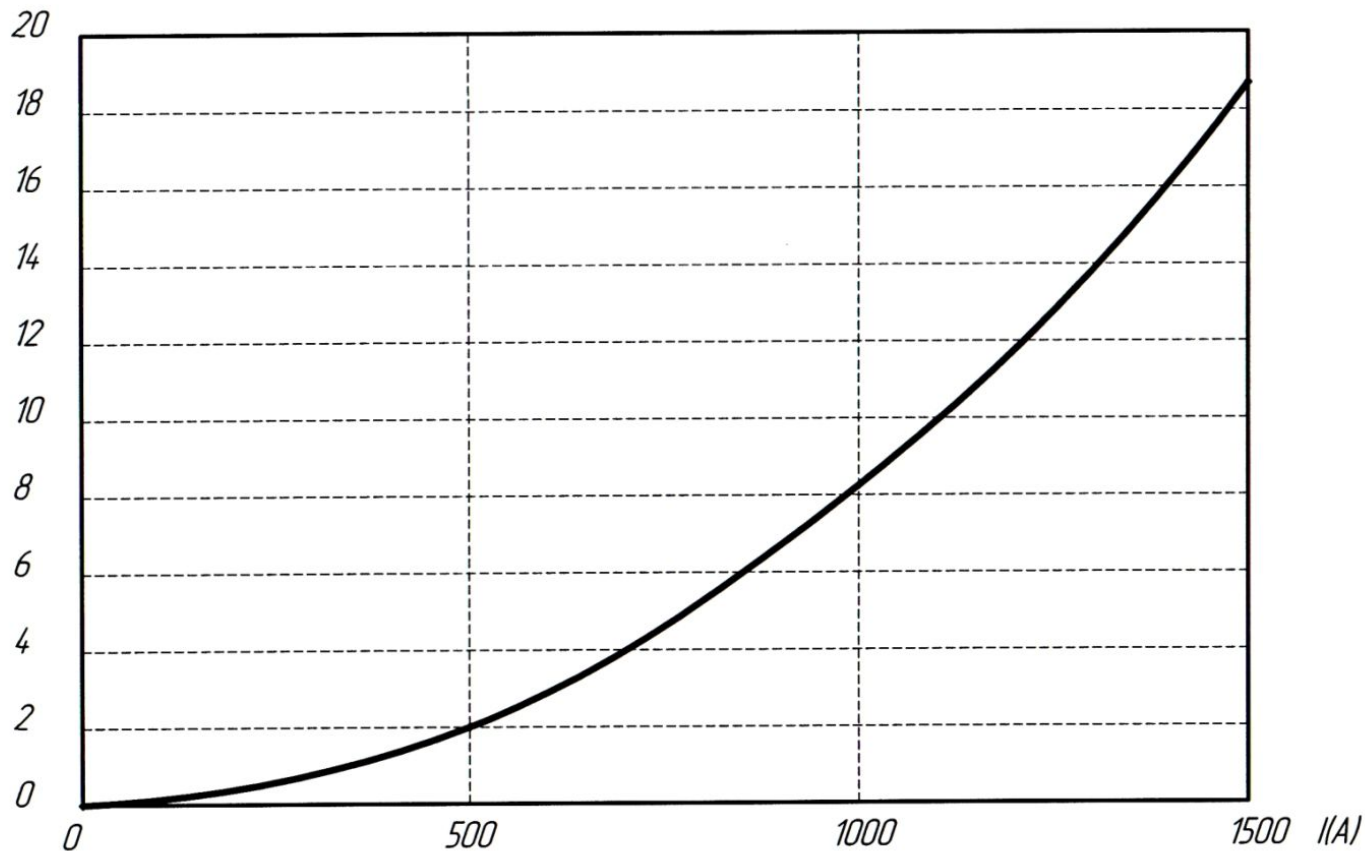
$$\mathcal{Q}_y = I^2 R_0 / k.$$

$$\mathcal{Q}_y = I^2 R_0 / (k - I^2 R_0 \alpha).$$

Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

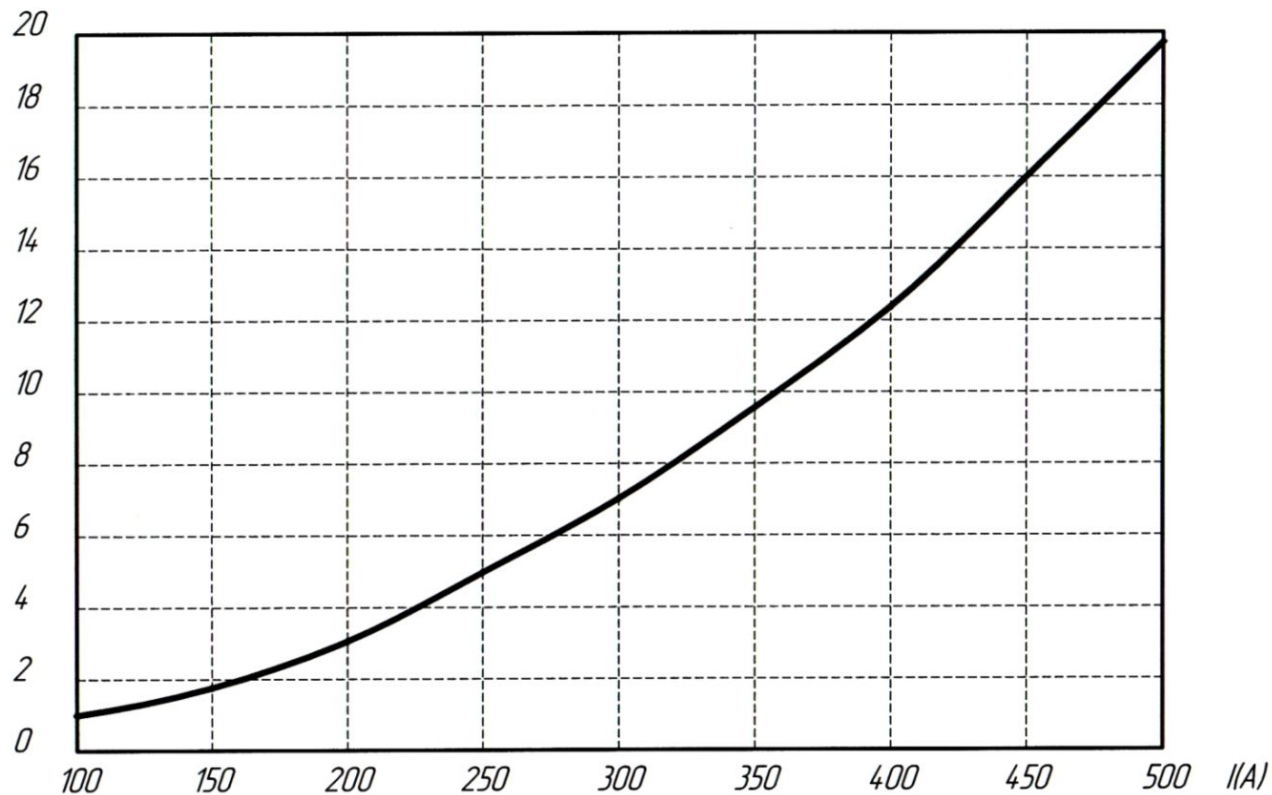
Зависимость дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия тягового постоянного тока

t (°C)



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

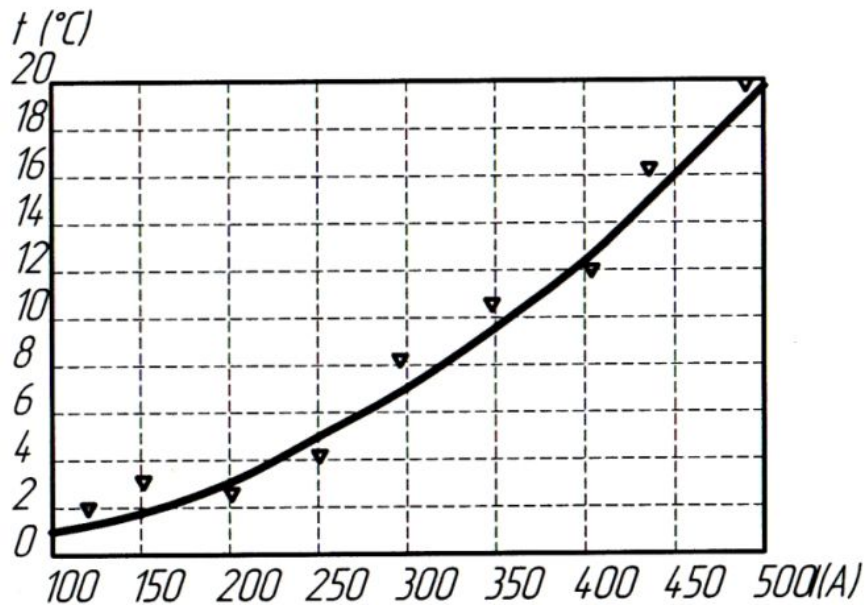
Зависимость дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия тягового переменного тока



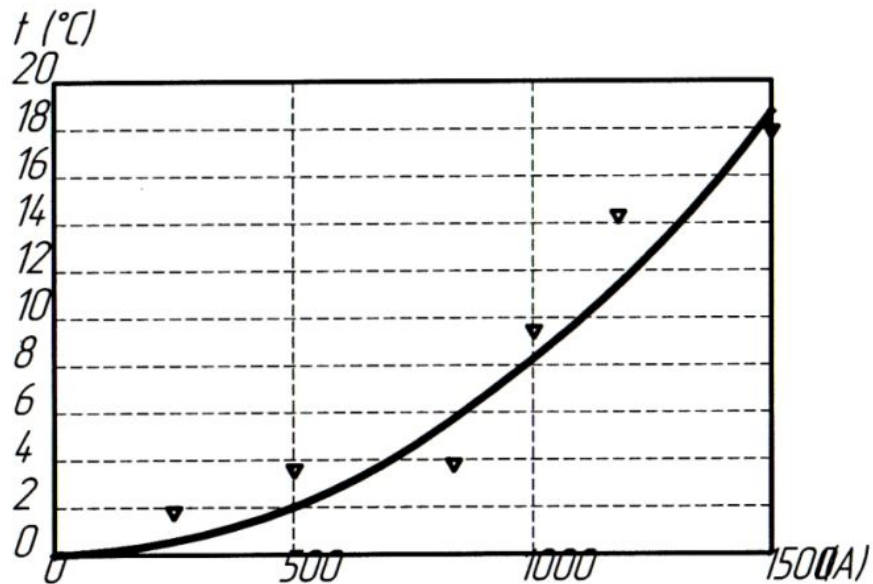
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

Зависимость дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия тяговых токов:

Зависимость дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия тягового переменного тока (экспериментальные данные - участка Белорецк-Карломан)



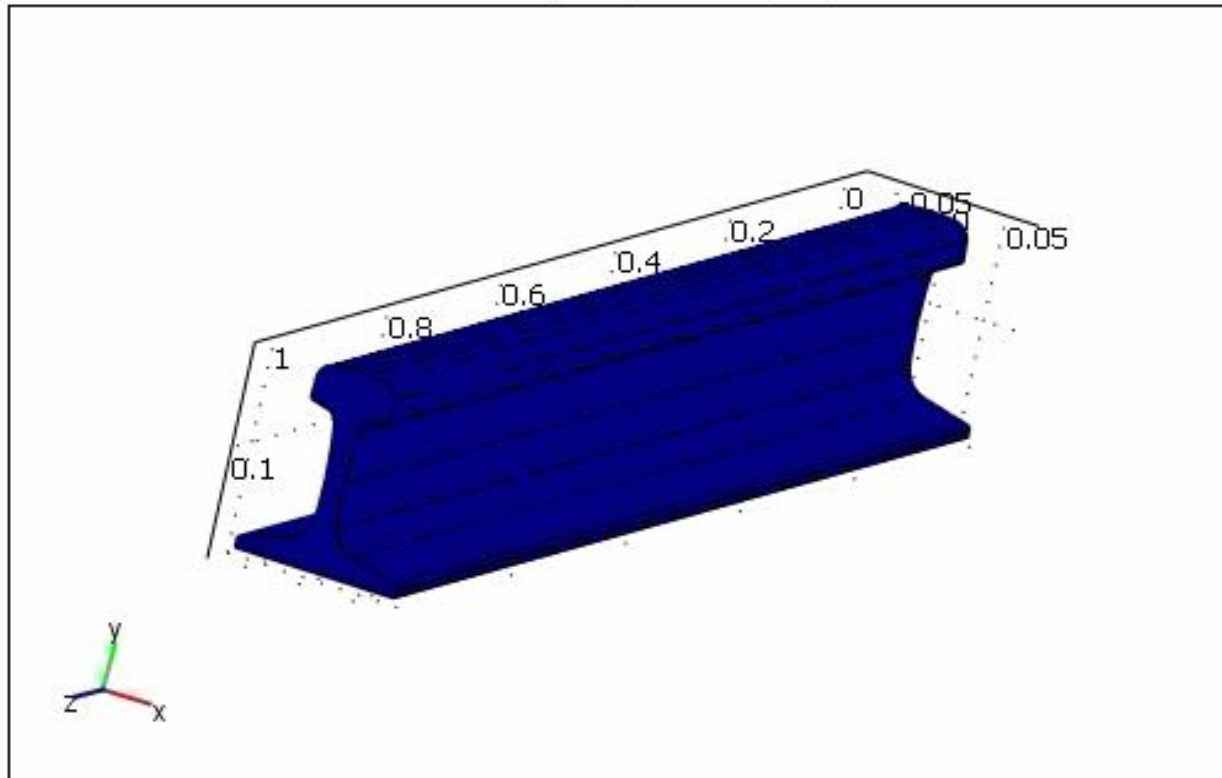
Зависимость дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия тягового постоянного тока (экспериментальные данные - нечетный путь Смышляевка-Самара)



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

Time=0

Boundary: Temperature [$^{\circ}\text{C}$]



Max : 55.0

55

50

45

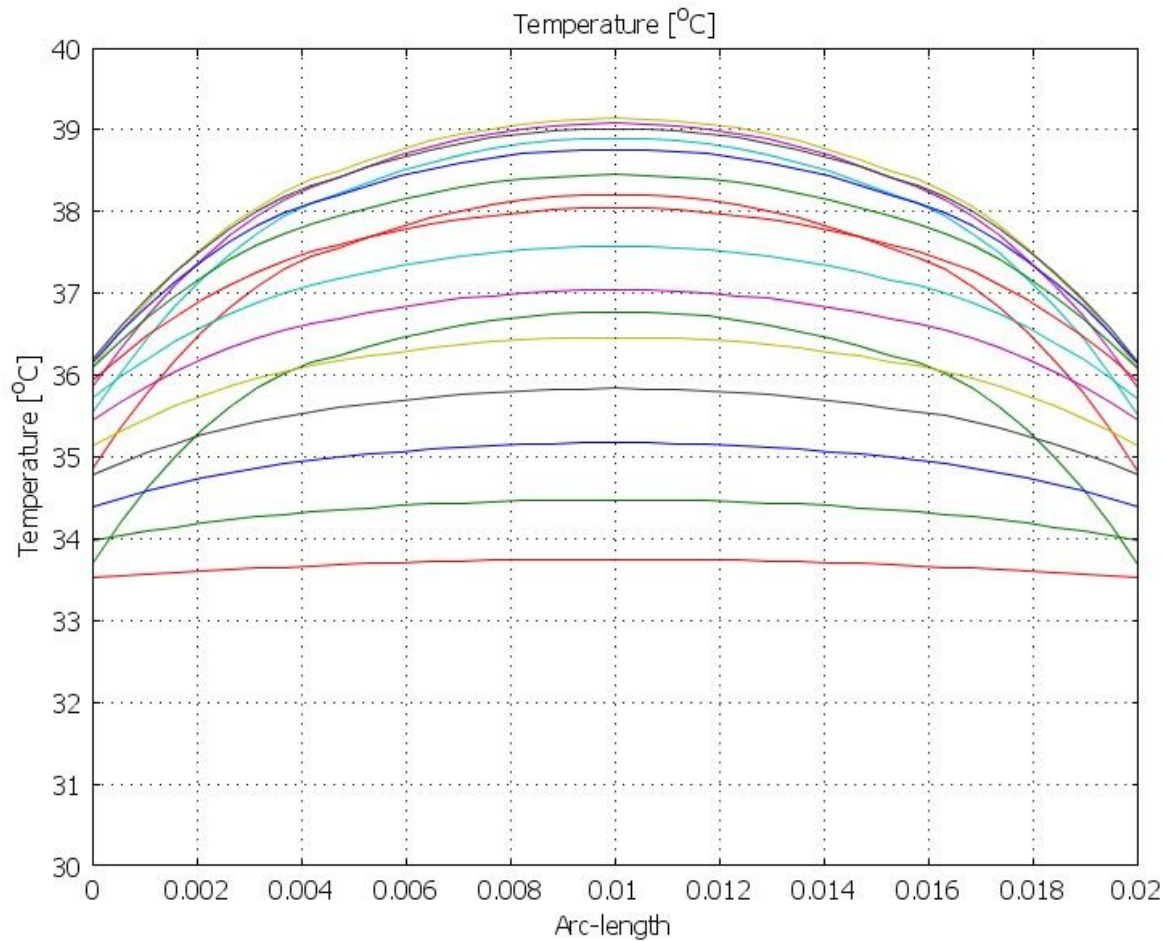
40

35

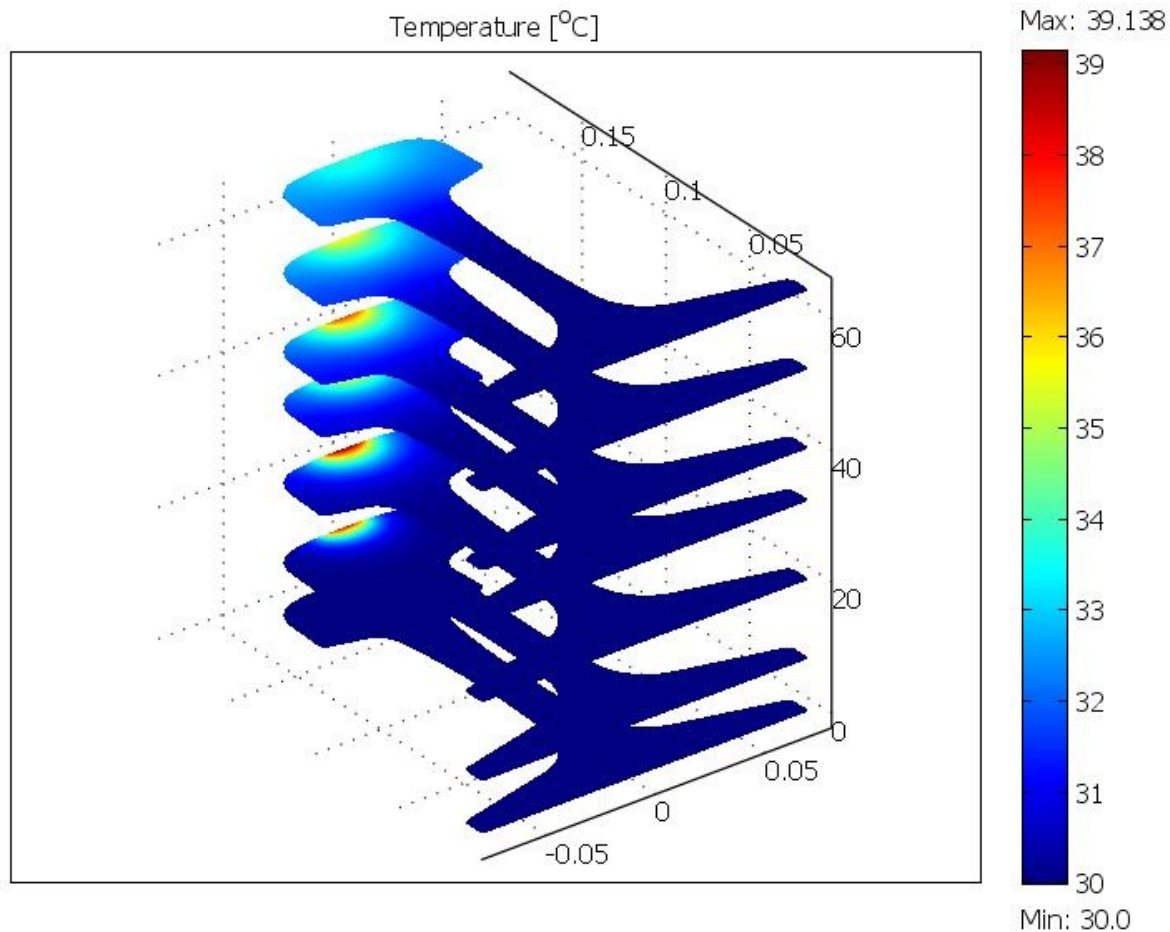
30

Min : 30.0

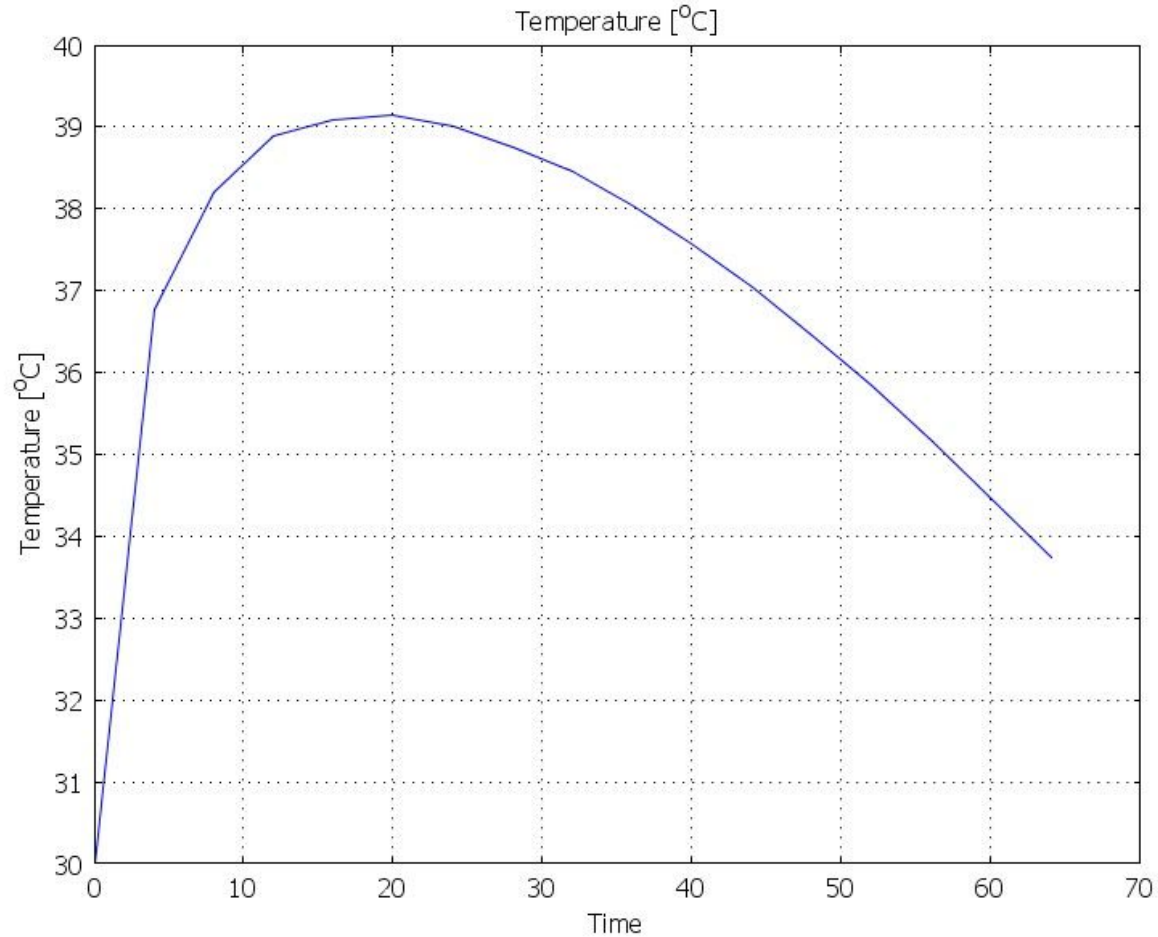
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов



Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

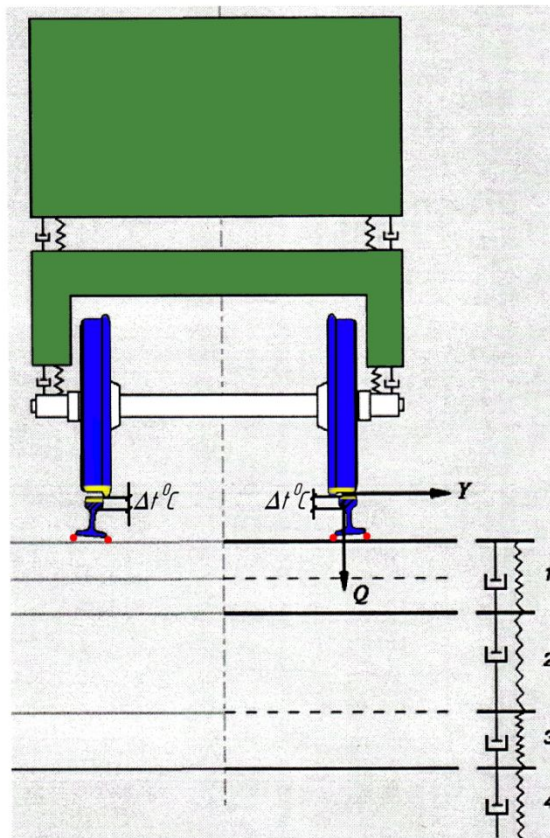


Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов



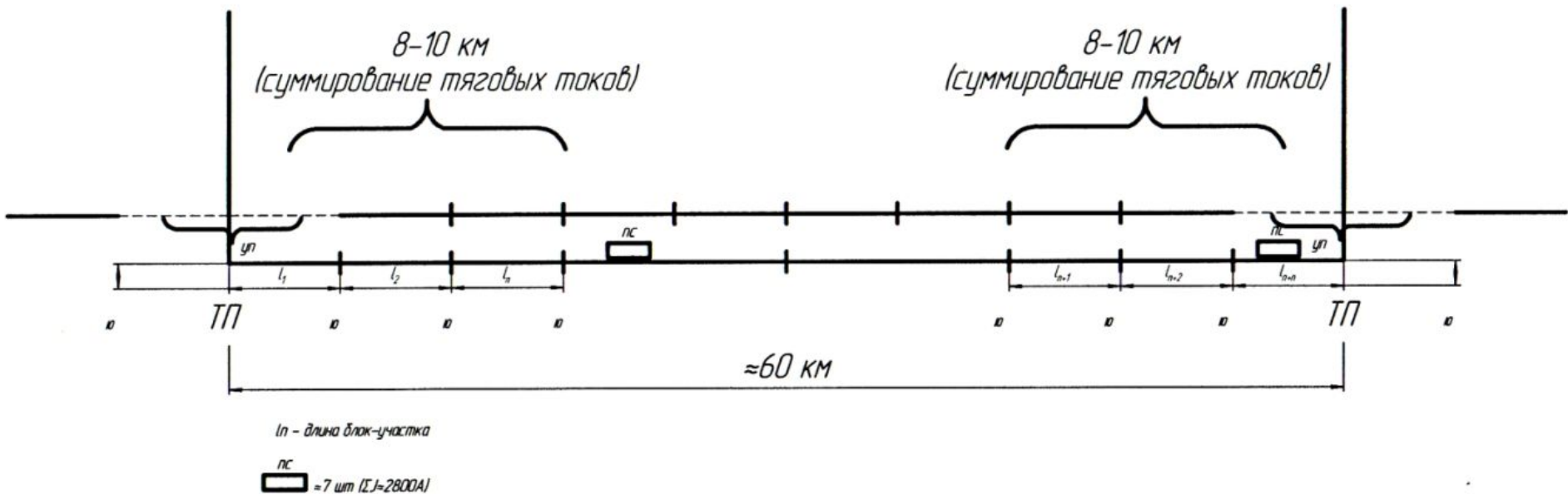
Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

Концентрация дополнительных температур в рельсовых плетях воздействия термодинамических факторов

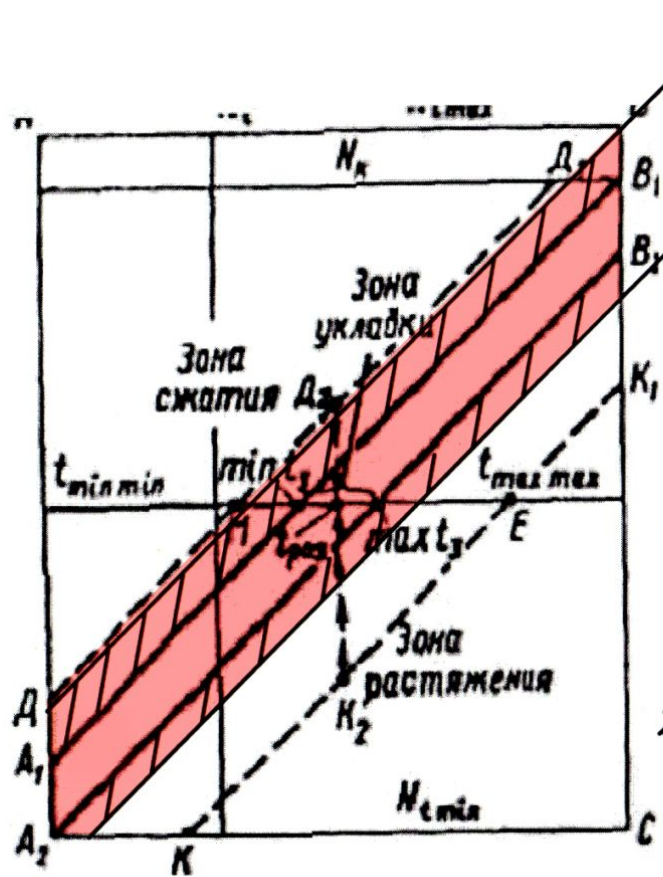


Расчет дополнительного нагрева рельсовых плетей от воздействия обратных тяговых токов

Схема раскладки рельсовых плетей на тяговом плече



Расчет интервала температур закрепления плетей с учетом термодинамических факторов



$$mint_3 = t_{max\ max} - [\Delta t_y];$$

$$maxt_3 = t_{min\ min} + [\Delta t_p]$$

$$mint_3 = t_{max\ max} - [\Delta t_y + 10^{\circ}C];$$

$$maxt_3 = t_{min\ min} + [\Delta t_p + 5^{\circ}C]$$

 интервал закрепления
рельсовых плетей, определенный
с учетом дополнительного нагрева