УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

БУДІВЕЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра залізничної колії і транспортних споруд

РОЗРАХУНОК ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ НА МІЦНІСТЬ І СТІЙКІСТЬ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до дипломного та курсового проєктування

з дисципліни

«ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ (СПЕЦКУРС)»

Частина 1

Харків – 2024

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри залізничної колії і транспортних споруд 08 квітня 2024 р., протокол № 11. Друге видання, перероблене і доповнене.

У методичних вказівках висвітлені питання розрахунку залізничної колії на міцність та стійкість під впливом поїзних навантажень від рухомого складу. Надана методика визначення напружень в елементах верхньої будови колії та на основній площадці земляного полотна. Представлено порядок розрахунку залізничної колії на стійкість із визначенням температурного інтервалу закріплення плітей безстикової колії.

Рекомендовано для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня всіх форм навчання спеціальності 273 «Залізничний транспорт» за освітньою програмою «Залізничні споруди та колійне господарство».

Укладачі:

доценти Д. О. Потапов,
В. Г. Вітольберг,
Д. А. Фаст

Рецензент
доц. А. О. Шевченко

ЗМІСТ

Вступ 5
1 Загальні положення 6
1.1 Мета розрахунку 6
1.2 Основні передумови та припущення при проведенні розрахунків 6
2 Визначення розрахункового динамічного навантаження на колію від рухомого складу 11
3 Визначення еквівалентного поїзного навантаження на колію 18
3.1 Загальні положення 18
3.2 Вибір розрахункової осі 21
4 Визначення напружень в елементах ланкової колії 24
5 Визначення напружень в елементах безстикової колії 31
5.1 Загальні положення 31
5.2 Температурні напруження та поздовжні сили в рейкових плітях безстикової колії 33
6 Допустимі напруження в елементах залізничної колії 36
6.1 Рекомендовані допустимі напруження в рейках 36
6.2 Рекомендовані допустимі напруження стискання під підкладкою в шпалах 37
6.3 Рекомендовані допустимі напруження стискання в баласті 38
6.4 Рекомендовані допустимі напруження стискання ґрунту на основній площадці земляного полотна 39
7 Оцінювання напруженого стану в елементах залізничної колії 39
7.1 Загальні положення 39
7.2 Умови міцності ланкової конструкції колії 40
7.3 Умови міцності безстикової конструкції колії 41
8 Розрахунок безстикової колії на стійкість і визначення температурних умов її укладання і експлуатації 43
8.1 Загальні положення 43

8.2 Розрахунок на стійкість за методом К. М. Міщенка 44
8.3 Розрахунок на стійкість за методом С. П. Першина 48
8.4 Розрахунок на стійкість за емпіричною формулою Є. М. Бромберга 50
8.5 Визначення температурних умов укладання
й експлуатації безстикової колії 52
Список літератури 58

ВСТУП

Дисципліна «Залізнична колія (спецкурс)» є однією з основних фахових складових для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня всіх форм навчання спеціальності 273 «Залізничний транспорт» за освітньою програмою «Залізничні споруди та колійне господарство».

У рамках дисципліни здобувачі повинні оволодіти навичками щодо визначення динамічних сил, що діють на колію від різних типів рухомого складу; вміти оцінювати напружено-деформований стан елементів залізничної колії; встановлювати умови міцності та стійкості колії; визначати рівень допустимих швидкостей руху в різних експлуатаційних та кліматичних умовах.

У методичних вказівках наведено порядок практичного інженерного розрахунку напружень в елементах верхньої будови колії та на основну площадку земляного полотна від впливу на них рухомого складу та природно-кліматичних факторів. Також в методичних вказівках викладено методику розрахунку умов укладання та експлуатації безстикової конструкції колії з визначенням температурних інтервалів її закріплення.

Методичні вказівки складено відповідно до чинних Правил розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість.

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1 Мета розрахунку

Результати розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість можуть бути використані при розв’язанні ряду інженерних задач в колійному господарстві, а саме:

– для визначення напружень і деформацій в елементах верхньої будови колії в заданих умовах експлуатації;

- для встановлення раціональних швидкостей руху рухомого складу в різних умовах експлуатації залізничної колії;

– при проведенні техніко-економічних розрахунків для вибору параметрів основних конструктивних елементів верхньої будови колії для заданих умов експлуатації;

– для встановлення умов експлуатації нового чи модернізованого рухомого складу;

– при вирішенні завдань щодо можливості та умов укладання ланкової або безстикової конструкції колії в заданих кліматичних і експлуатаційних умовах;

– при аналізі причин порушення міцності (злам рейки) або стійкості колії (викид) на діючих ділянках колії;

– при аналізі причин сходжень рухомого складу;

– на етапі проєктування нових конструкцій колії.

1.2 Основні передумови та припущення при проведенні розрахунків

Залізнична колія, як складна просторова конструкція (рисунок 1.1), знаходиться під впливом системи різноманітних за величиною та орієнтацією в просторі і часі силових факторів (динамічні сили від

рухомого складу, температурні напруження, власні напруження в елементах, що виникають внаслідок їхнього виготовлення, укладання, утримання і ремонту).

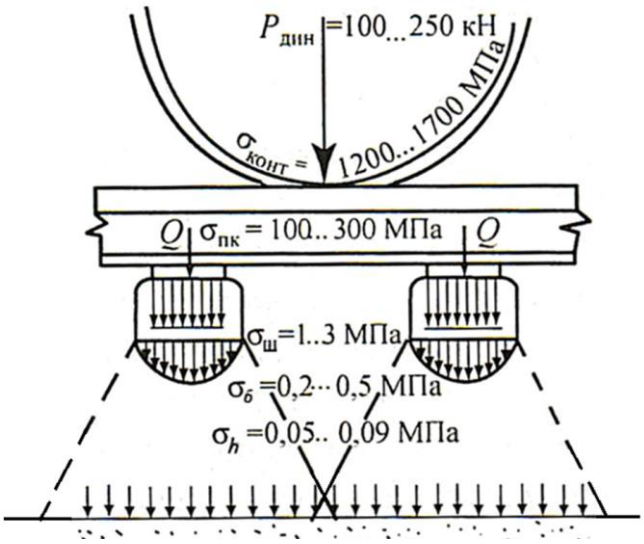


Рисунок 1.1 – Схема силової роботи залізничної колії під дією навантажень від рухомого складу

Тому для точного визначення напружено-деформованого стану такої конструкції необхідні складні розрахункові схеми як самої колії, так і відповідної рухомої одиниці.

Розрахунки колії базуються на законах теоретичної та будівельної механіки. Зовнішні впливи на колію також, як і опір колії їм, змінні і випадкові за довжиною і в часі, тому загальний напружено-деформований стан колії має імовірнісний характер.

Для практичних цілей в розрахунок вводять ряд припущень, які дещо ідеалізують реальну конструкцію колії та спрощують розрахункові схеми, але практично мало впливають на кінцевий результат. Такий розрахунок прийнято називати ***практичним інженерним розрахунком колії на міцність.***

Основні передумови та припущення, які прийняті в практичних інженерних розрахунках залізничної колії на міцність.

1 Кожна з двох рейок колії розглядається як нерозрізна балка нескінченної довжини постійного перерізу, що вільно лежить на суцільній рівнопружній основі (рисунок 1.2, а), або на окремих точкових рівнопружних опорах (рисунок 1.2, б).

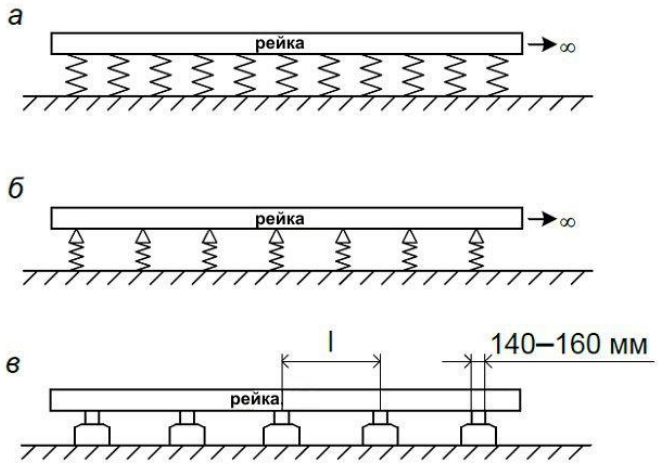


Рисунок 1.2 – Розрахункова схема рейки

Фактично ж рейки лежать на пружно-переривчастій основі (рисунок 1.2, в). Заміна фактичної розрахункової схеми на першу дає різницю у величинах напружень у рейках на 2–4 %, на другу – на 5–7 %.

2 Обидві рейки вважаються рівнозавантаженими, а вертикальні сили прикладаються по осі їхньої симетрії (рисунок 1.3).

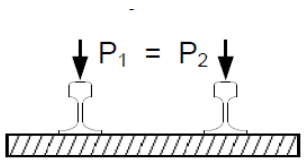


Рисунок 1.3 – Вертикальні навантаження на рейки

3 Розрахунковий перетин обирається на відстані не менше 3,5 метрів від стику, також не враховується наявність підухилу рейок.

4 Розрахунки проводять для однієї рейки. Урахування сумісної роботи обох рейкових ниток здійснюється при визначенні розрахункових параметрів колії.

5 Основний розрахунок рейки виконується на вплив вертикальних сил (рисунок 1.4).

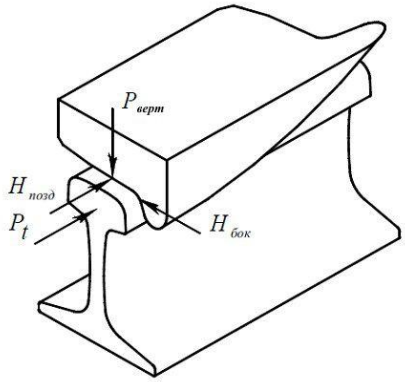


Рисунок 1.4 – Схема сил, що діють на рейку

Наявність горизонтальних поперечних сил (позацентрового прикладення вертикального навантаження), які виникають в реальних умовах експлуатації, враховується за допомогою емпіричних коефіцієнтів, визначених експериментально для різних видів рухомого складу.

Із поздовжніх сил враховуються тільки температурні сили, які виникають в рейках внаслідок коливань температури навколишнього середовища.

6 Прийнята гіпотеза про лінійну залежність між прогинами та зовнішніми навантаженнями (рисунок 1.5).

Іншими словами, пружна реакція підрейкової основи q вважається лінійно залежною від прогину (деформації) y, тобто $q = -U \cdot y$, де U – коефіцієнт пропорційності або модуль пружності підрейкової основи.

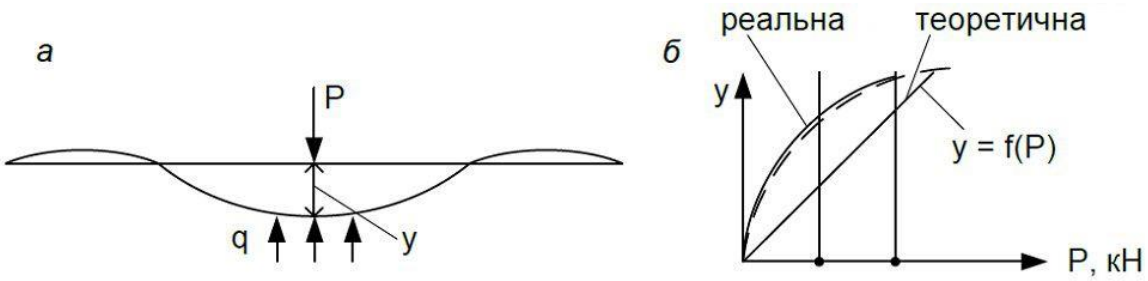


Рисунок 1.5 – Розрахункова схема рейки з вертикальною силою (а) та залежність прогину від навантаження (б)

7 Характеристики колії (модуль пружності підрейкової основи, коефіцієнт відносної жорсткості підрейкової основи і рейки та інші) рахуються детермінованими (невипадковими, постійними) величинами.

8 Приймається, що в розрахунковому перерізі рейки діє максимальне імовірне динамічне колісне навантаження, а вплив сусідніх коліс приймається у вигляді їхніх середніх динамічних тисків, з урахуванням того, що максимум динамічного тиску розрахункового колеса не співпадає з максимумом тиску сусідніх коліс.

9 При дії на колію системи вантажів використовується закон незалежності – напруження та деформації в розрахунковому перерізі складаються з урахуванням їхніх величини та знаку.

10 Рейка розраховується за напруженнями вигину. Контактні напруження, напруження під головкою та інші місцеві напруження не враховуються.

11 При розрахунках приймається, що колеса під час руху не відриваються від рейок і не створюють ударних впливів.

12 Власною вагою елементів верхньої будови колії нехтують.

13 Приймається, що рейкова колія і рухомий склад знаходяться у справному стані, який відповідає вимогам ПТЕ і нормам утримання.

2 ВИЗНАЧЕННЯ РОЗРАХУНКОВОГО ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА КОЛІЮ ВІД РУХОМОГО СКЛАДУ

Як відомо, люба рухома одиниця має ***необресорену частину*** (колісні пари, буксові вузли, комплекти пружин) та ***обресорену частину*** – кузов, що обпирається на ресорні комплекти. Сучасні локомотиви та вагони – візкового типу (рисунок 2.1).

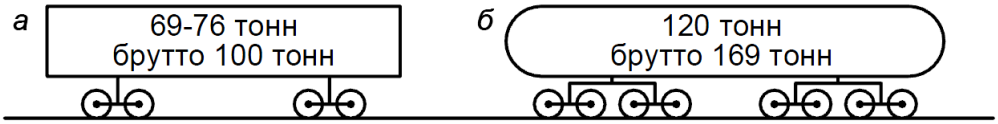


Рисунок 2.1 – Схема вантажних вагонів із двовісними візками (а) та чотиривісними візками (б)

Статичне навантаження $P_{ст}$ на колію екіпажа, що стоїть нерухомо, залежить від його ваги Q та кількості осей (коліс) і може бути визначено як

$$P_{ст} = \frac{Q}{n}, \tag{2.1}$$

де n – кількість осей або коліс.

При русі екіпажів, окрім статичного впливу на колію, починають діяти додаткові сили інерції, які виникають внаслідок появи спільних коливань в системі «колесо – залізнична колія» (рисунок 2.2).

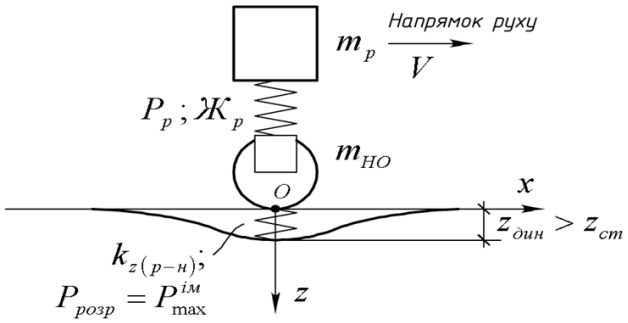


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема для визначення сил взаємодії (m_p – маса обресореної частини, яка приходиться на одне колесо; $m_{НО}$ – те ж, необресореної частини)

Можна виділити такі чотири різновиди додаткових вертикальних сил інерції:

P_p – сили інерції від коливань обресореної частини екіпажа;

$P_{рн}$ – сили інерції від коливань необресореної частини екіпажа при проходженні колесом нерівності на колії;

$P_{інк}$ – сили інерції від коливань необресореної частини екіпажа через наявність ізольованих нерівностей на колесах рухомого складу;

$P_{бнк}$ – сили інерції від коливань необресореної частини екіпажа через наявність безперервних нерівностей на колесах рухомого складу;

Всі ці додаткові складові є змінними випадковими величинами з двома основними параметрами – середнім значенням та середньоквадратичним відхиленням, які залежать від багатьох експлуатаційних факторів та конструктивних особливостей рухомої одиниці.

Тобто в загальному випадку ***середнє значення сили*** $\bar{P}$, ***що діє від колеса на рейку*** буде дорівнювати:

$$\bar{P} = P_{ст} + \bar{P}_p + \bar{P}_{рн} + \bar{P}_{інк} + \bar{P}_{бнк}, \qquad (2.2)$$

де $P_{ст}$ – статичне навантаження від екіпажа на колію;

$\overline{P}_р, \overline{P}_{рн}, \overline{P}_{інк}, \overline{P}_{бнк}$ – середні значення додаткових сил інерції.

Оскільки при коливальному процесі за один цикл середні значення останніх трьох складових дорівнюють нулю, остаточно отримуємо вираз для визначення $\overline{P}$:

$$\overline{P} = P_{ст} + \overline{P}_р . \tag{2.3}$$

Оскільки, як вже було зазначене вище, кожна із додаткових вертикальних сил інерції може приймати довільні значення у різні проміжки часу по довжині колії, розрахункове динамічне навантаження визначається із залученням основних положень теорії імовірності.

Як ***розрахункове динамічне навантаження*** $P_{розр}^{ДИН}$ приймається максимальне імовірне значення від сукупності впливу статичного навантаження та змінних додаткових сил інерції, що буде дорівнювати:

$$P_{розр}^{ДИН} = P_{імовірн}^{MAX} = \overline{P} + 2{,}5 \cdot S_{P_{розр}^{ДИН}}, \tag{2.4}$$

де 2,5 – коефіцієнт, який відповідає появі $P_{імовірн}^{MAX}$ з імовірністю 0,994, тобто із 1000 випадків проходу коліс в розрахунковому перерізі тільки в шести з них можливе перевищення $P_{імовірн}^{MAX}$;

$S_{P_{розр}^{ДИН}}$ – середньоквадратичне відхилення розрахункового динамічного навантаження, що діє від колеса на рейку:

$$S_{P_{розр}^{ДИН}} = \sqrt{S_р^2 + S_{рн}^2 + q_1 \cdot S_{інк}^2 + (1 - q_1) \cdot S_{бнк}^2}, \tag{2.5}$$

де S_p – середньоквадратичне відхилення сили від коливань обресореної частини екіпажа;

$S_{рн}$ – середньоквадратичне відхилення сили від коливань необресореної частини екіпажа при проходженні колесом нерівності на колії;

$S_{інк}$ – від коливань необресореної частини екіпажа через наявність ізольованих нерівностей на колесах рухомого складу;

$S_{бнк}$ – від коливань необресореної частини екіпажа через наявність безперервних нерівностей на колесах рухомого складу;

q_1 – частка коліс, що мають ізольовані нерівності (за відсутності фактичних даних приймається 0,05).

З урахуванням формул (2.4) та (2.5) вираз для визначення ***розрахункового динамічного навантаження*** $P_{розр}^{ДИН}$ можна записати як

$$P_{розр}^{ДИН} = P_{імовірн}^{MAX} = P_{ст} + \bar{P}_p + 2{,}5 \cdot \sqrt{S_p^2 + S_{рн}^2 + q_1 \cdot S_{інк}^2 + (1-q_1) \cdot S_{бнк}^2} \,. \qquad (2.6)$$

Усі позначення, що входять до (2.6) наведені вище.

Умовно приймається, що ***величина сили інерції від коливань обресореної частини*** екіпажа $\bar{P}_p$ складає три чверті від її максимального значення:

$$\bar{P}_p = 0{,}75 P_p^{MAX} \,, \qquad (2.7)$$

де P_p^{MAX} – максимальне значення сили інерції, що викликається коливаннями обресореної частини екіпажа, кН.

У свою чергу P_p^{MAX} можна визначити одним з таких способів:

- з використанням емпіричної залежності динамічних прогинів z_{max} ресорних комплектів від швидкостей руху:

$$P_p^{\max} = Ж_p \cdot z_{\max}, \tag{2.8}$$

де $Ж_p$ – жорсткість ресорного комплекту візка, що приведена до одного колеса, кН/м;

$z_{\max}$ – максимальний динамічний прогин ресор, м.

Значення $Ж_p$ і $z_{\max}$ для різних типів рухомого складу наведено в таблиці А.1 технічних характеристик рухомого складу (додаток А);

- з використанням коефіцієнта вертикальної динаміки екіпажа k_d:

$$P_p^{MAX} = k_d \cdot \left(P_{cm} - q_k\right), \tag{2.9}$$

де q_k – вага необресореної частини екіпажа, яка приходиться на одне колесо (таблиця А.1).

Значення k_d для різних типів локомотивів за результатами експериментів із встановлення допустимих швидкостей руху (для колії та локомотивів у справному стані) наведені в таблицях А.2, А.3.

За відсутності експериментальних даних значення коефіцієнта вертикальної динаміки k_d визначається за формулою

$$k_d = 0.1 + 0.2\frac{V}{f_{cm}}, \tag{2.10}$$

де V – швидкість руху, км/год.

f_{cm} – величина статичного прогину ресорного комплекту рухомої одиниці.

При двоступеневому ресорному підвішуванні f_{cm} приймається як сума статичних прогинів обох ступенів, які приведені в довідкових даних рухомого складу (таблиця А.1).

Далі наведено вирази з визначення середньоквадратичних відхилень додаткових сил інерції, що входять до виразів (2.5), (2.6).

Середньоквадратичне відхилення сили інерції від коливань обресореної частини екіпажа S_p визначається за формулою

$$S_p = 0,08 P_p^{\max} \tag{2.11}$$

Середньоквадратичне відхилення сили інерції $S_{рн}$ ***від коливань необресореної частини екіпажа*** при проходженні колесом нерівності на колії визначається за формулою:

$$S_{рн} = 1,788 \cdot 10^{-4} \alpha_1 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \varepsilon \cdot l_ш \overline{P} V \sqrt{\frac{U_z q_к}{k}}, \tag{2.12}$$

де α_1 – коефіцієнт, що враховує вид шпал, для залізобетонних шпал $\alpha_1 = 0,931$, для дерев'яних – $\alpha_1 = 1,0$;

β – коефіцієнт, що враховує вплив типу рейок на виникнення динамічної нерівності в колії, для рейок типу Р75 $\beta = 0,82$, Р65 $\beta = 0,87$, UIC60 $\beta = 0,9$, Р50 $\beta = 1$;

ε – коефіцієнт, що враховує вплив матеріалу та конструкції шпал, для залізобетонних шпал $\varepsilon = 0,322$, для дерев'яних – $\varepsilon = 1,0$;

γ – коефіцієнт, що враховує вплив роду баласту на виникнення динамічної нерівності колії, для щебеню і сортованого гравію $\gamma = 1$, для кар'єрного гравію та черепашнику $\gamma = 1,1$, для піщаного баласту – $\gamma = 1,5$;

$l_ш$ – відстань між осями шпал. Розрахункові відстані $l_ш$ між осями шпал приймаються 0,50, 0,543, 0,60 і 0,625 м відповідно при 2000, 1840, 1680 і 1600 шпалах на 1 км;

U_z – модуль пружності підрейкової основи, МПа, приймається за таблицею Б.4 додатку Б;

k – коефіцієнт відносної жорсткості підрейкової основи та рейки

$$k = \sqrt[4]{\frac{U_z}{4E \cdot I}}, \tag{2.13}$$

де U_Z – вертикальний модуль пружності підрейкової основи;

E – модуль пружності рейкової сталі ($2{,}1 \cdot 10^5$ МПа);

I – момент інерції рейки у вертикальній площині, приймається за таблицею Б.1;

V – швидкість руху, км/год;

q – величина необресореної маси екіпажу, яка приходиться на одне колесо, кН, приймається за таблицею А.1.

Середньоквадратичне відхилення сили інерції $S_{інк}$ ***від коливань необресореної частини екіпажа*** через наявність ізольованих нерівностей на колесах рухомого складу визначається за формулою

$$S_{інк} = 0{,}5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_0 \cdot \xi \cdot e_0 \cdot \frac{U_z}{k}, \tag{2.14}$$

де ξ – безрозмірний прогин (відношення додаткового прогину рейки, що виникає внаслідок наявності на колесі ізольованої нерівності, до глибини цієї нерівності). Для більшості розрахункових випадків (за швидкості руху поїздів $V \geq 20$ км/год) можна приймати величину безрозмірного прогину рівною $\xi_{max}=1{,}47$;

e_0 – глибина ізольованої нерівності на колесі, $e_0 = 0,047 \cdot 10^{-2}$ *м*;

α_0 – коефіцієнт, що враховує вплив інерції мас колії, які коливаються, на величину динамічної сили від колеса. Цей коефіцієнт визначається як відношення приведеної необресореної маси колеса і приведеної маси колії, що бере участь у взаємодії. Значення коефіцієнтів α_0: для колії з дерев'яними шпалами $\alpha_0 = 0,433$, для колії з залізобетонними шпалами $\alpha_0 = 0,403$.

Середньоквадратичне відхилення сили інерції $S_{бнк}$ ***від коливань необресореної частини екіпажа*** через наявність безперервних нерівностей на колесах рухомого складу визначається за формулою

$$S_{бнк} = \frac{0,052 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_0 \cdot U_z \cdot V^2 \cdot \sqrt{q_k}}{d^2 \cdot \sqrt{10^{-1} \cdot k \cdot U - 3,26 \cdot k^2 \cdot q_k \cdot 10^{-2}}}, \qquad (2.15)$$

де d – діаметр колеса, таблиця А.1.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНОГО ПОЇЗНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА КОЛІЮ

3.1 Загальні положення

Під час руху поїзда (одиночного екіпажа) на колію діє система зосереджених сил – тисків від коліс візків. Навантаження, яке визначається як сума впливів зусиль від кожного з коліс у розрахунковому перерізі, називають ***еквівалентним навантаженням*** $P_{екв}$ (рисунок 3.1).

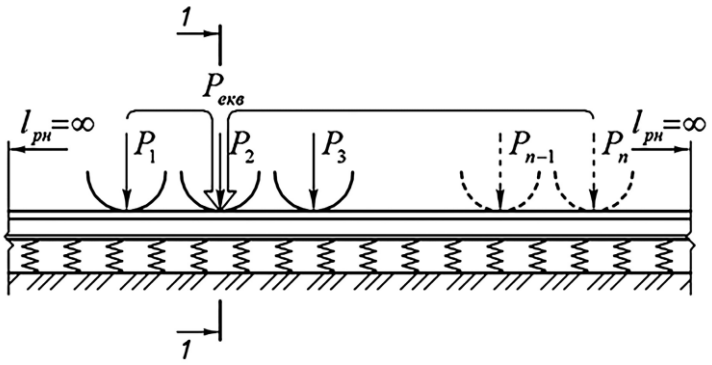


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема для визначення еквівалентних навантажень

За вихідними положеннями приймається, що одне з коліс візка локомотива або вагона, яке знаходиться над розрахунковим перерізом, передає на рейку максимальне імовірне динамічне навантаження $P_{розр}^{ДИН}$, інші – середнє значення сили $\bar{P}$ (тобто ймовірний максимум динамічного навантаження розрахункового колеса не збігається з ймовірним максимумом навантажень сусідніх коліс).

В практичних розрахунках зазвичай достатньо врахувати дію двох сусідніх коліс, розташованих по обидва боки від розрахункового, оскільки далі розташовані колеса практично здійснюють лише незначний вплив на розрахунковий переріз.

Еквівалентне навантаження $P_{екв}^{I}$ для ***розрахунків напружень в рейках*** від дії згинаючого моменту та еквівалентне навантаження $P_{екв}^{II}$ ***для розрахунків напружень в елементах підрейкової основи*** визначаються за формулою

$$\left.\begin{aligned} P_{екв}^{I} &= P_{розр}^{ДИН} + \sum \bar{P}_i \cdot \mu_i \\ P_{екв}^{II} &= P_{розр}^{ДИН} + \sum \bar{P}_i \cdot \eta_i \end{aligned}\right\}, \qquad (3.1)$$

де μ_i, η_i – ординати лінії впливу згинальних моментів та прогинів від дії одиничного колісного навантаження (P =1).

У формулі (3.1) $P_{екв}^{I}$, $P_{екв}^{II}$ за своєю суттю заміняють собою систему колісного поїзного навантаження, що діє на колію.

Функції μ_i (рисунок 3.2) та η_i (рисунок 3.3) знаходяться залежно від величини $k \cdot x_i$ де x_i – відповідає відстаням від розрахункового перерізу до кожного колеса, що враховується:

$$\begin{aligned} \mu_i &= e^{-k \cdot x} \left(\cos(k \cdot x_i) - \sin(k \cdot x_i) \right) \\ \eta_i &= e^{-k \cdot x} \left(\cos(k \cdot x_i) + \sin(k \cdot x_i) \right) \end{aligned} \tag{3.2}$$

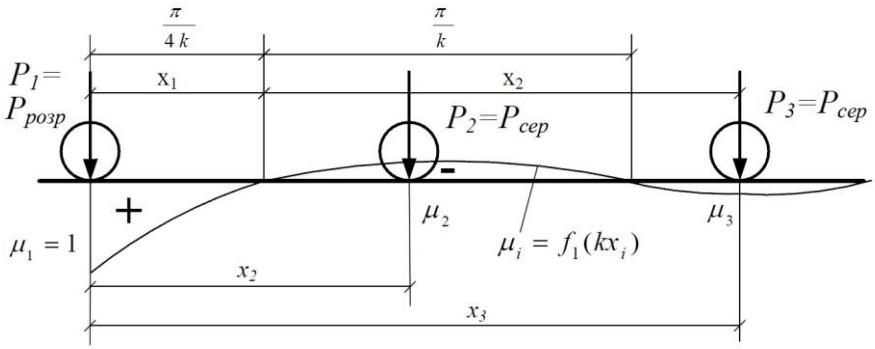


Рисунок 3.2 – Лінія впливу згинальних моментів μ_i під дією тривісного візка

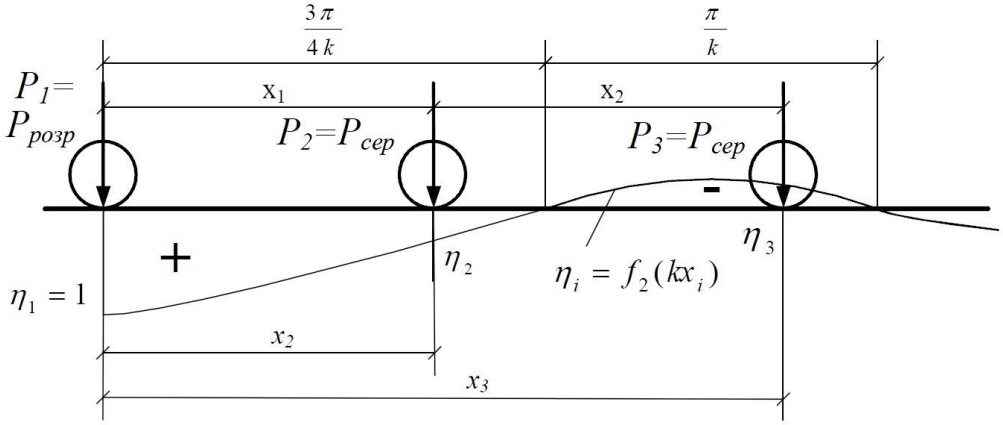


Рисунок 3.3 – Лінія впливу прогинів рейки η_i під дією тривісного візка

3.2 Вибір розрахункової осі

Для визначення розрахункової осі (колеса) кожне колесо з групи коліс у візку по черзі приймається за розрахункове, решта коліс в цей час вважаються сусідніми.

Сусідні колеса можуть здійснювати як позитивний, так і негативний вплив (внаслідок зміни знаку функцій μ і η по довжині), тобто вони можуть довантажувати або розвантажувати розрахунковий переріз (рисунки 3.2, 3.3).

Для того щоб визначити найбільші ймовірні напруження в елементах верхньої будови колії, необхідно знайти найгірший варіант завантаження рейки системою колісних навантажень. Робиться це на лініях впливу μ і η, тобто вибирається найгірший варіант завантаження ліній впливу.

Для пошуку найбільш невигідного розташування колісного навантаження на лінії впливу, при якому величини еквівалентних вантажів $P_{екв}^{I}$ і $P_{екв}^{II}$, будуть мати максимальні значення. Очевидно необхідно, щоб крім завжди діючого в розрахунковому перерізі від розрахункового колеса $P_{розр}^{ДИН} = P_{імовірн}^{MAX}$, сумарний вплив на розрахунковий переріз інших коліс давав би також максимальний ефект, тобто $\sum \overline{P}_i \mu_i = \max$, $\sum \overline{P}_i \eta_i = \max$. Це означає, що алгебраїчна сума ординат ліній впливу моментів і прогинів від впливу інших коліс (окрім розрахункового) має бути максимальною: $\sum \mu_i = \max$ і $\sum \eta_i = \max$. При цьому максимум завантаження лінії впливу моментів $\sum \overline{P}_i \mu_i = \max$ може не співпадати з максимумом завантаження ліній впливу прогинів $\sum \overline{P}_i \eta_i = \max$, тому пошук найнесприятливішого розташування колісного навантаження на лініях впливу μ і η необхідно визначати окремо.

Для визначення найбільших напружень вигину та кручення в рейках під дією еквівалентного навантаження $P_{екв}^{I}$ за розрахункову вісь приймається:

- при двовісному візку – перша вісь;
- при тривісному візку – перша вісь, якщо виконується умова $x = \frac{\pi}{4 \cdot k} \le L_{вісь}$, де $L_{вісь}$ – відстань між центрами осей колісних пар (рисунок 3.4, а). В іншому випадку за розрахункову вісь приймається друга.

При визначенні напружень в елементах підрейкової основи під дією еквівалентного навантаження $P_{екв}^{II}$ за розрахункову вісь приймається:

- при двовісному візку – перша вісь (рисунок 3.4, б);
- при тривісному візку – перша вісь, якщо виконується умова $x = \frac{3 \cdot \pi}{4 \cdot k} \le L_{вісь}$, (рисунок 3.4, б). В іншому випадку за розрахункову вісь приймається друга (рисунок 3.4, в).

Для візків з більшою кількістю осей найбільш несприятливе положення поїзного колісного навантаження визначається за умов $\sum \mu_i = \max$ або $\sum \eta_i = \max$.

При $k \cdot x > 5{,}5$ впливом сусідніх осей нехтують через його незначність.

Величини функцій μ_i і η_i для різних значень kx_i вже прораховані і наведені в таблиці В.1.

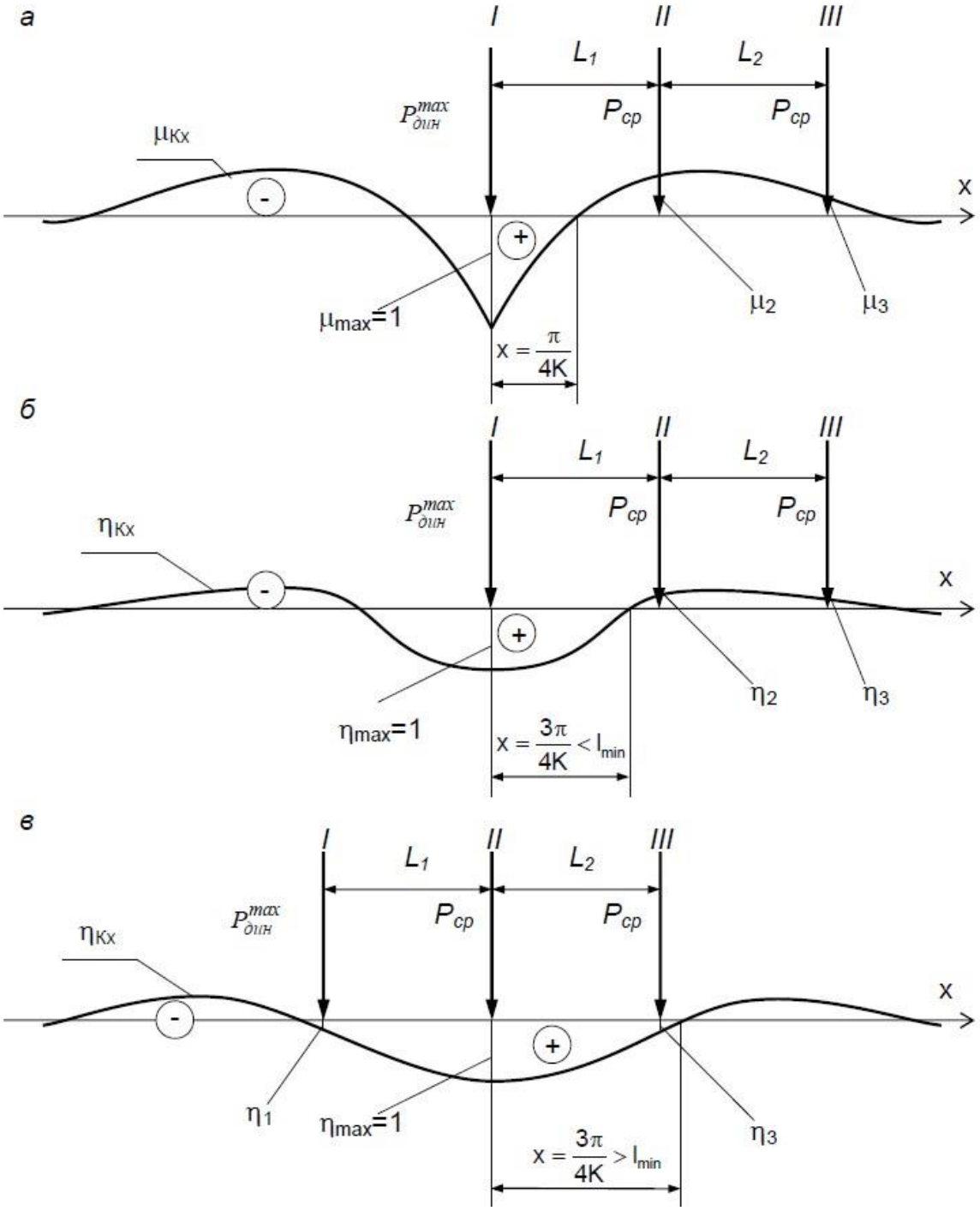


Рисунок 3.4 – Схеми для визначення найбільш невигідного розташування колісного навантаження (розрахункової осі)

4 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ В ЕЛЕМЕНТАХ ЛАНКОВОЇ КОЛІЇ

Для визначення напружень в елементах ланкової колії необхідно попередньо розрахувати величину згинального моменту $M_{дин}$, що виникає в рейці під дією поїзного навантаження, та силу тиску рейки на підрейкову опору $Q_{дин}$ в розрахунковому перерізі.

Величини $M_{дин}$ та $Q_{дин}$ визначаються з урахуванням значень еквівалентних поїзних навантажень $P^{I}_{екв}$, $P^{II}_{екв}$ за формулами

$$M_{дин} = \frac{P^{I}_{екв}}{4 \cdot k}, \tag{4.1}$$

$$Q_{дин} = \frac{P^{II}_{екв} \cdot k \cdot l_{ш}}{2}. \tag{4.2}$$

Величину динамічного прогину рейки в розрахунковому перерізі можна оцінити за допомогою виразу

$$Z_{дин} = \frac{P^{II}_{екв} \cdot k}{2 \cdot U}. \tag{4.3}$$

Максимальні напруження вигину і кручення в рейці (в кромці головки $\sigma_{к-г}$ та кромці підошви $\sigma_{к-п}$) при дії вертикальних і горизонтальних поперечних сил від коліс рухомого складу визначаються за формулами

$$\left.\begin{aligned} \sigma_{к-г} &= m_{к-г} \cdot \frac{M_{дин}}{W_{головки}} \\ \sigma_{к-п} &= f \cdot \frac{M_{дин}}{W_{підошви}} \end{aligned}\right\}, \tag{4.4}$$

де f – спеціальний коефіцієнт, який враховує дію горизонтальних поперечних сил в кривих ділянках колії та крутного моменту, що утворюється внаслідок позацентрового передавання вертикальних сил на рейку (приймається за таблицею А.4).

$m_{к-г}$ – перехідний коефіцієнт, визначається

$$m_{к-г} = \frac{Z_г}{Z_п} + (f - 1) \cdot \frac{b_г}{b_п}\ , \tag{4.5}$$

де $b_г$, $b_п$ – відповідно ширина головки і підошви рейки (приймається за таблицею Б.1);

$Z_г$, $Z_п$ – відстань від центральної горизонтальної осі до верху головки і низу підошви рейки відповідно (приймається за таблицею Б.1);

$W_{підошви}, W_{головки}$ – моменти опору рейки, відповідно по низу підошви і по верху головки (приймається за таблицею Б.1).

Напруження зминання в шпалах під підкладкою (прокладкою) визначаються залежно від величини сили тиску рейки на опору $Q_{дин}$:

$$\sigma_ш = \frac{Q_{дин}}{\omega} \cdot 10, \tag{4.6}$$

де ω – опорна площа підкладки або підрейкової прокладки (таблиця Б.2).

Напруження стискання в баласті під шпалою також залежать від величини сили тиску рейки на опору $Q_{дин}$:

$$\sigma_б = \frac{Q_{дин}}{\Omega_\alpha} \cdot 10, \tag{4.7}$$

де $\Omega_\alpha = \frac{1}{2}\alpha \cdot a \cdot b$ – ефективна опорна площа напівшпали з урахуванням її вигину (a, b – довжина шпали і ширина нижньої її постелі, α – коефіцієнт згину шпали). Для типових конструкцій шпал Ω_α приймається за таблицею Б.3.

Напруження всередині баластового шару (на глибині $h > 15$ см від підошви шпали, в тому числі і **на основній площадці земляного полотна**) залежать від величини тиску шпал на баласт і від місця розташування розрахункової точки (рисунок 4.1).

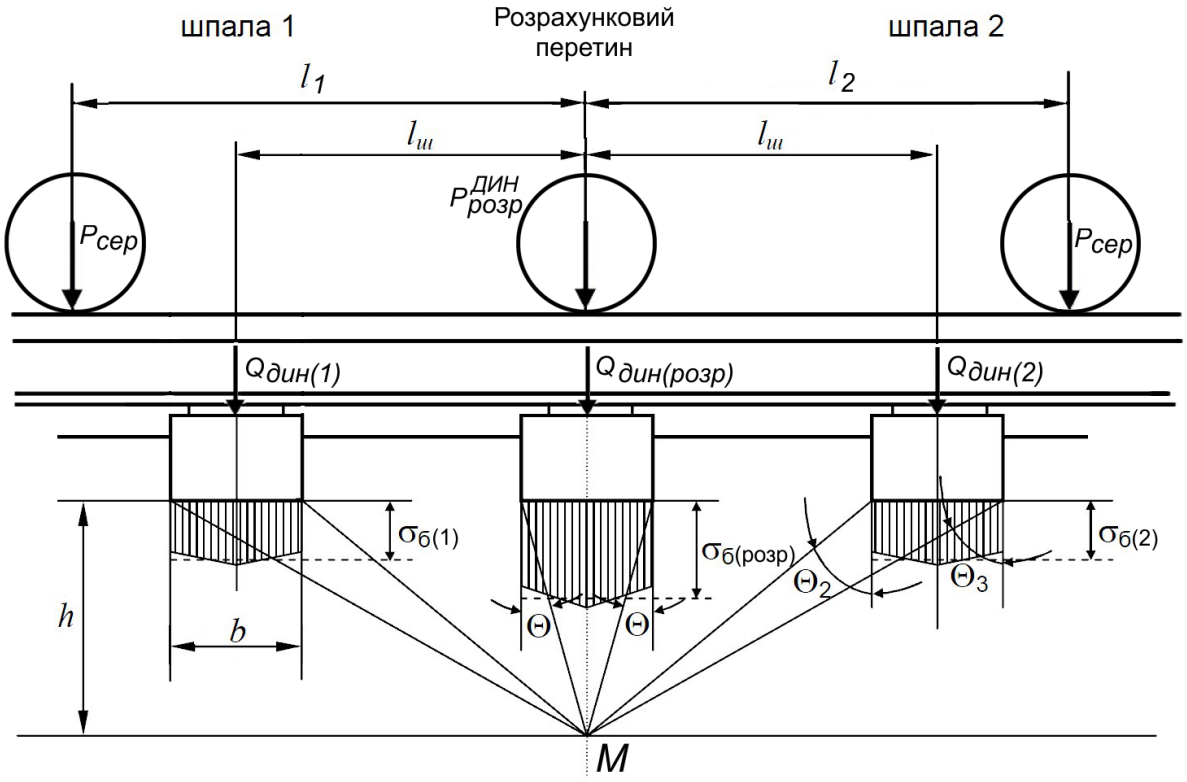


Рисунок 4.1 – Схема передавання тиску на земляне полотно від суміжних шпал

Через те, що найбільші напруження в баласті виникають у зонах безпосередньо розташованих під підрейковими опорами – шпалами, в практичних розрахунках прийнято:

- враховувати вплив на розрахункову точку *M* (що знаходиться на глибині *h* від нижньої постелі шпали) не лише самої розрахункової шпали, але й вплив сусідніх шпал, розташованих поруч;
- визначати напруження безпосередньо під розрахунковою шпалою (на її вертикальній осі) при розташуванні над нею розрахункового колісного навантаження $P_{розр} = P_{дин}^{\max}$;
- враховувати вплив на рейкову нитку сумарного еквівалентного динамічного навантаження, яке складається із впливу розрахункового колеса з максимальним динамічним навантаженням $P_1 = P_{розр} = P_{дин}^{\max}$ і впливу сусідніх з ним (зліва та справа) коліс із середнім значенням навантаження $P_2 = P_3 = \overline{P}$.

Напруження в розрахунковій точці *M* (рисунок 4.1) залежать від величини тиску шпал на баласт, від місця розташування розрахункової точки, що характеризується глибиною *h* і кутами $\Theta, \Theta_1, \Theta_2$, що утворились між вертикальною віссю і конусами тисків, що виходять від країв шпал, які розглядаються.

Саму величину напружень $\sigma_{б(h)}$ у баласті в розрахунковій точці *M* можна визначити:

$$\sigma_{б(h)} = \sigma_{h(1)} + \sigma_{h(розр)} + \sigma_{h(2)}, \qquad (4.8)$$

де $\sigma_{h(розр)}$ – напруження, МПа, в розрахунковій точці від тиску шпали, яка розташована в розрахунковому перерізі;

$\sigma_{h(1)}, \sigma_{h(2)}$ – напруження, МПа, в тій самій точці *M* від тиску сусідніх шпал (відповідно ліворуч та праворуч від розрахункової).

Кожен з членів суми в правій частині рівняння (4.8) є функцією від тисків на баласт, що передаються безпосередньо від нижньої постелі шпал,

відповідно: під розрахунковою шпалою $\sigma_{h(розр)}$, під шпалою, розташованою ліворуч $\sigma_{бс_2}$ і шпалою, розташованою праворуч від розрахункової $\sigma_{бс_3}$.

Напруження від тиску шпали, яка розташовується в розрахунковому перерізі, визначається:

$$\sigma_{h(розр)} = \sigma_{б(розр)} \cdot r_1 \cdot \left[0,635 \cdot m \cdot C_1 + 1,275 \cdot (2 - m) \cdot C_2\right], \qquad (4.9)$$

де $\sigma_{б(розр)}$ – напруження стискання в баласті під підошвою розрахункової шпали, МПа; визначене за виразом (4.7);

r_1 – коефіцієнт, що враховує матеріал шпали (приймається рівним 0,8 для залізобетонних шпал, 0,7 – для дерев'яних);

m – коефіцієнт, що враховує заміну реальної криволінійної епюри тиску шпали на баласт епюрою ламаного обрису:

$$m = \frac{0,873}{\sigma_{б(розр)} + 0,427}, \qquad (4.10)$$

при $m < 1$ для подальших розрахунків приймається $m = 1$;

C_1, C_2 – коефіцієнти, що враховують геометричні розміри шпали та глибину, на якій визначається напруження:

$$\begin{cases} C_1 = \dfrac{b}{2 \cdot h} - \dfrac{b^3}{24 \cdot h^3} \\ C_2 = \dfrac{b \cdot h}{b^2 + 4 \cdot h^2} \end{cases}, \qquad (4.11)$$

де b – ширина нижньої постелі шпали (додаток Б);

h – відстань від нижньої постелі шпали до точки, де визначається напруження.

Для типових конструкцій шпал значення коефіцієнтів C_1 і C_2 при різних h і b наведені в таблиці Б.6.

Інші дві складові напружень $\sigma_{h(1)}, \sigma_{h(2)}$, що входять до (4.9), визначаються за формулами

$$\begin{cases} \sigma_{h(1)} = \dfrac{r_1}{\pi} \cdot A \cdot \sigma_{б(1)} \\ \sigma_{h(2)} = \dfrac{r_1}{\pi} \cdot A \cdot \sigma_{б(2)} \end{cases} \tag{4.12}$$

де $\sigma_{б(1)}, \sigma_{б(2)}$ – напруження стискання в баласті під нижніми постелями сусідніх шпал;

A – коефіцієнт, для типових конструкцій шпал можна приймати за таблицею Б.7, або визначити за формулою

$$A = \Theta_1 - \Theta_2 + 0,5 \cdot \left(\sin 2\Theta_1 - \sin 2\Theta_2 \right), \tag{4.13}$$

де кути Θ_1, Θ_2 (у радіанах) знаходяться за формулами

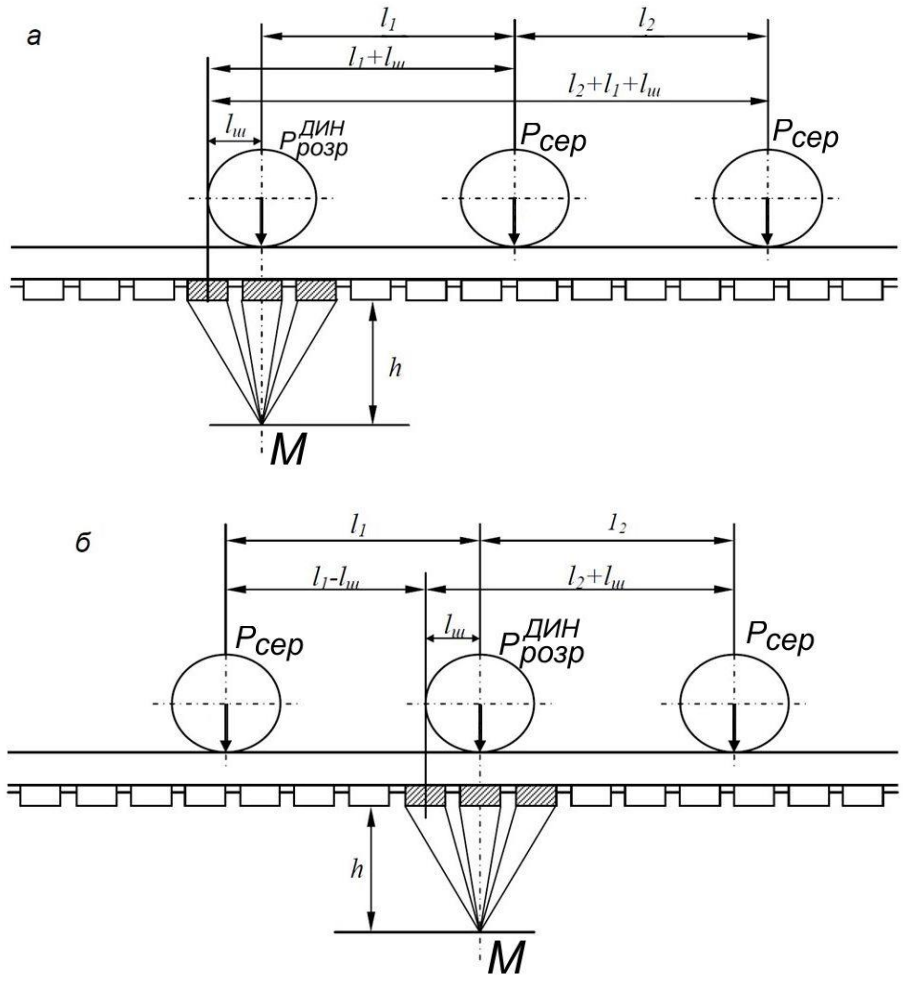
$$\begin{cases} \Theta_1 = arctg \dfrac{l_ш + 0,5 \cdot b}{h}, \\ \Theta_2 = arctg \dfrac{l_ш - 0,5 \cdot b}{h} \end{cases} . \tag{4.14}$$

Напруження в баласті $\sigma_{б(1)}, \sigma_{б(2)}$ під сусідніми з розрахунковою шпалами визначаються за умови максимального динамічного навантаження розрахункового колеса, розташованого над розрахунковою шпалою, та середніх навантажень від решти коліс. Визначаються аналогічно виразу (4.7) залежно від величини тиску рейки на шпали, тобто:

$$\sigma_{б(1)} = \frac{Q_{дин(1)}}{\Omega_\alpha} \cdot 10 = \frac{k \cdot l_ш}{2 \cdot \Omega_\alpha} \cdot P^{II}_{екв(1)} \cdot 10 \ , \qquad (4.15)$$

$$\sigma_{б(2)} = \frac{Q_{дин(2)}}{\Omega_\alpha} \cdot 10 = \frac{k \cdot l_ш}{2 \cdot \Omega_\alpha} \cdot P^{II}_{екв(2)} \cdot 10 \ . \qquad (4.16)$$

При визначенні еквівалентних поїзних навантажень $P^{II}_{екв(1)}$ та $P^{II}_{екв(2)}$ залежно від кількостей осей у візку екіпажа ординати лінії впливу прогинів рейкової нитки η_i визначаються з урахуванням впливу всіх колісних пар на шпали, які розташовані поряд із розрахунковою (рисунок 4.2).



а – розрахункова вісь перша; б – розрахункова вісь друга

Рисунок 4.2 – Розрахункова схема з визначення напружень в баласті для тривісного візка

Для тривісних візків розрахункові формули для визначення $P^{II}_{екв(1)}$ та $P^{II}_{екв(2)}$ наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Розрахункові формули для визначення $P^{II}_{екв(1)}$ для розрахунку напружень в баласті (на основній площадці земляного полотна)

Номер шпали, поруч із розрахунковою	Розрахункова вісь у візку	
	Перша	Друга
Шпала № 1	$P^{II}_{екв(1)} = P^{ДИН}_{розр} \cdot \eta_{l_ш} + \bar{P} \cdot (\eta_{l_ш+l_1} + \eta_{l_ш+l_1+l_2})$	$P^{II}_{екв(1)} = P^{ДИН}_{розр} \cdot \eta_{l_ш} + \bar{P} \cdot (\eta_{l_1-l_ш} + \eta_{l_ш+l_2})$
Шпала № 2	$P^{II}_{екв(2)} = P^{ДИН}_{розр} \cdot \eta_{l_ш} + \bar{P} \cdot (\eta_{l_1-l_ш} + \eta_{l_1-l_ш+l_2})$	$P^{II}_{екв(2)} = P^{ДИН}_{розр} \cdot \eta_{l_ш} + \bar{P} \cdot (\eta_{l_1+l_ш} + \eta_{l_2-l_ш})$

Для двовісних візків значення $P^{II}_{екв(1)}$, $P^{II}_{екв(2)}$ можна знайти за формулами:

$$P^{II}_{екв(1)} = P^{ДИН}_{розр} \cdot \eta_{l_ш} + \bar{P} \cdot \eta_{l_ш+l_1}, \quad (4.17)$$

$$P^{II}_{екв(2)} = P^{ДИН}_{розр} \cdot \eta_{l_ш} + \bar{P} \cdot \eta_{l_1-l_ш}. \quad (4.18)$$

5 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ В ЕЛЕМЕНТАХ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ

5.1 Загальні положення

Особливістю розрахунку безстикової колії на міцність, на відміну від ланкової, є необхідність урахування температурних напружень σ_t в рейкових плітях, що можуть досягати значних величин порівняно з ланковою конструкцією.

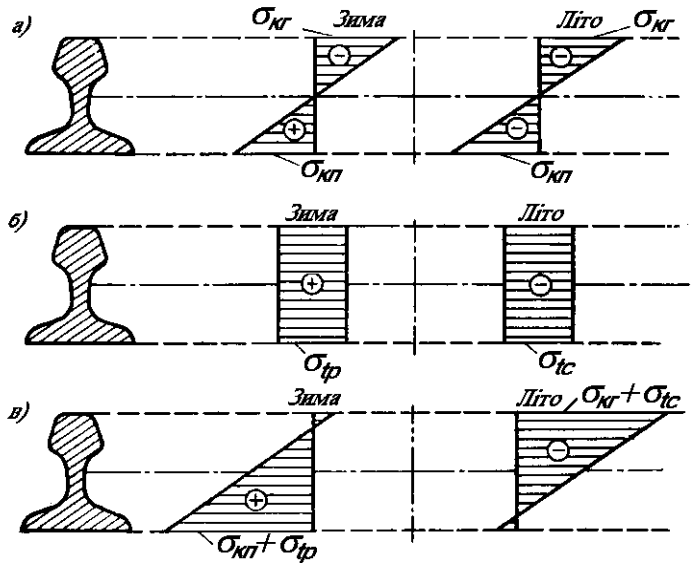
Розрахунки напружень в шпалах $\sigma_{шп}$, в баласті $\sigma_{б}$, на основній площадці $\sigma_{оп}$ земляного полотна, а також розрахунки вертикальних прогинів рейкових ниток не відрізняються від розрахунків цих величин в ланковій колії, за розділом 4.

Безстикова колія – це особлива конструкція залізничної колії, головною конструктивною відзнакою якої є зварені рейкові пліті. Порівняно з ланковою, ця конструкція є більш прогресивною. Відсутність в рейкових плітях стиків покращує плавність руху поїздів, подовжує строки служби елементів верхньої будови колії, зменшує опір руху поїзда і, як наслідок, знижує витрати на тягу, підвищує надійність електричних рейкових кіл, знижує рівень шуму від рухомих поїздів. Крім того, використання в безстиковій колії залізобетонних шпал заощаджує цінний природний матеріал – деревину.

Однак, поряд з беззаперечними позитивними якостями порівняно з ланковою конструкцією, безстикова колія має ряд особливостей в роботі і навіть деякі труднощі при її утриманні і проведенні ремонтно-колійних робіт.

Одна із основних особливостей роботи безстикової конструкції колії полягає в тому, що закріплені рейкові пліті з підвищенням або зниженням їхньої температури не можуть змінювати свою довжину. Основна (середня) частина пліті завжди залишається нерухомою. Подовжуються або скорочуються тільки кінцеві ділянки довжиною 70-100 м. Зміна температури рейки відносно температури, при якій рейкові пліті були закріплені, викликає появу в них значних поздовжніх температурних зусиль, які суттєво впливають на загальний напружений стан (рисунок 5.1).

При підвищенні температури в рейкових плітях виникають поздовжні стискуючі сили, які разом із силами угону, особливо в жарку погоду, можуть призвести до різкої втрати стійкості рейкошпальної решітки – викиду колії.



а – напруження згину від поїзного навантаження;
б – температурні напруження; в – сумарні напруження

Рисунок 5.1 – Епюри нормальних напружень в рейках
в літній і зимовий періоди експлуатації

При зниженні температури виникають розтягувальні напруження, які разом з напруженнями, що викликані згином рейки від поїзного навантаження, насамперед при низьких температурах, можуть викликати перенапруження в підошві рейки і злам пліті з утворенням небезпечного зазору або розрив рейкового стику через зріз стикових болтів.

5.2 Температурні напруження та поздовжні сили в рейкових плітях безстикової колії

Відомо, що зміна температури рейки викликає зміну її довжини, а це означає, що чим більша довжина рейки, тим більший треба зазор, величина якого обмежується умовами міцності колії та безпеки руху поїздів. Виходячи з умов динамічної дії рухомого складу на колію, величина зазору

має бути найменшою. Тому вона визначається з умови, щоб зазор досягав нульових розмірів при найвищій температурі в певній кліматичній зоні, а найбільших, але не більше конструктивних – при найнижчій температурі.

Відлік температурних змін ведеться відносно температури, при якій рейка закріплена в колії. Ця температура називається нейтральною. Зміна температури відносно нейтральної викликає зміну довжини рейки, вільної від закріплення, або появу температурних зусиль в рейці при нездійсненій зміні її довжини тобто за наявності опору.

З точки зору температурної роботи, рейка розглядається як стрижень відповідної довжини Його подовження або скорочення Δl за відсутності опору переміщенню визначається за формулою

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta t, \qquad (5.1)$$

де Δt – зміна температури рейки відносно нейтральної температури.

Якщо розділити обидві частини рівняння (5.1) на l, то вийде відносна температурна деформація (подовження або скорочення)

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta t \ . \qquad (5.2)$$

За законом Гука напруження в рейці пропорційні відносній його деформації

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \ . \qquad (5.3)$$

У зв'язку з цим при нездійсненій температурній деформації рейки в ній виникнуть напруження, викликані зміною температури

$$\sigma_t = \alpha \cdot E \cdot \Delta t \ . \qquad (5.4)$$

Якщо у вираз (5.4) підставити числові значення і, як величини постійні стосовно рейкової сталі, вийде спрощений вираз для визначення температурних напружень, МПа,

$$\sigma_t \approx 2,5 \cdot \Delta t \ . \qquad (5.5)$$

Температурна ж сила, що діє на рейку, буде дорівнювати:

$$P_t = \alpha \cdot E \cdot F \cdot \Delta t \approx 2,5 \cdot F \cdot \Delta t \ , \qquad (5.6)$$

а на колію в цілому

$$P_t = 2 \cdot \alpha \cdot E \cdot F \cdot \Delta t \approx 5 \cdot F \cdot \Delta t \ , \qquad (5.7)$$

де F – площа поперечного перерізу рейки.

Із формул (5.3–5.5) видно, що величина температурних напружень в рейці не залежить від її довжини. При нездійсненому подовженні або скороченні в рейці будь-якої довжини виникає однакова температурна сила.

6 ДОПУСТИМІ НАПРУЖЕННЯ В ЕЛЕМЕНТАХ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

6.1 Рекомендовані допустимі напруження в рейках

*Як **рекомендовані допустимі напруження в рейках*** приймаються допустимі напруження вигину рейок $[\sigma_r]$ при їхній роботі на витривалість. За роботою [1], величини рекомендованих допустимих напружень встановлені окремо для вагонів як основної маси рухомого складу, що впливає на колію, та для локомотивів. Значення $[\sigma_r]$ для рейок з пропуску нормативного тоннажу наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Рекомендовані допустимі напруження в рейках з пропуску нормативного тоннажу

Вид рухомого складу	Безстикова конструкція колії				Ланкова конструкція	
	З термічною обробкою		Без термічної обробки		З термічною обробкою	Без термічної обробки
	в головці рейки	в підошві рейки	в головці рейки	в підошві рейки		
Вагони	350	280	260	205	280	205
Локомотиви	395	320	290	235	320	235

По мірі пропуску тоннажу в структурі рейкового металу проходять незворотні зміни, що призводять до зниження характеристик витривалості рейок. Тому, якщо після пропуску нормативного тоннажу рейки з різних причин залишаються в експлуатації, величину допустимих напружень слід приймати за таблицею 6.2.

Для рейок, що пропустили нормативний тоннаж, коефіцієнт запасу приймається рівним $K_н$=1,4.

Таблиця 6.2 – Рекомендовані допустимі напруження в рейках, що пропустили нормативний тоннаж

Вид рухомого складу	Безстикова конструкція колії				Ланкова конструкція	
	З термічною обробкою		Без термічної обробки		З термічною обробкою	Без термічної обробки
	в головці рейки	в підошві рейки	в головці рейки	в підошві рейки		
Вагони	285	225	210	165	225	165
Локомотиви	325	265	240	195	265	195

6.2 Рекомендовані допустимі напруження стискання під підкладкою в шпалах

Допустимі напруження стискання під підкладкою (прокладкою при скріпленнях без металевої підкладки) в залізобетонних шпалах приймаються $\left[\sigma_{ш}^{з.б.}\right] = 4,0$ МПа за умови забезпечення міцності і тріщиностійкості [1].

За допустимі напруження стискання під підкладкою на ділянках з дерев'яними шпалами $\left[\sigma_{ш}^{дер}\right]$ приймаються граничні напруження, встановлені за розрахунками на зминання деревини під підкладками [2]. Залежно від заданої величини вантажонапруженості та виду рухомого складу $\left[\sigma_{ш}^{дер}\right]$ приймають за таблицею 6.3.

Таблиця 6.3 – Рекомендовані допустимі напруження в дерев'яних шпалах під підкладкою

Вид рухомого складу	$\left[\sigma_{ш}^{дер}\right]$, МПа, при вантажонапруженості				
	>80	40–80	40–25	25–10	<10
Локомотиви	0,8	1,2	1,6	2,0	3,0
Вагони	0,7	1,1	1,5	1,8	2,7

6.3 Рекомендовані допустимі напруження стискання в баласті

Допустимі напруження стискання в баласті $[\sigma_б]$ встановлені через необхідність обмеження інтенсивності накопичення залишкових деформацій в баластовому шарі, що розвиваються під рухомим навантаженням. Обмеження має звести до мінімуму роботи з виправлення положення рейкових ниток, що викривляються при накопиченні залишкових деформацій баластового шару.

Допустимі напруження стискання в баласті $[\sigma_б]$, рекомендовані для умов нормальної експлуатації колії, залежать від вантажонапруженості та від матеріалу баластового шару, приймаються за таблицею 6.4.

Таблиця 6.4 – Рекомендовані допустимі напруження в баласті

Вид рухомого складу та баласту		$[\sigma_б]$, МПа, при вантажонапруженості,				
		>80	40–80	40–25	25–10	<10
Локомотиви	щебінь	0,38	0,4	0,42	0,45	0,5
	пісок	0,24	0,25	0,26	0,28	0,31
	гравій	0,26	0,28	0,3	0,32	0,36
Вагони	щебінь	0,24	0,26	0,3	0,35	0,4
	пісок	0,15	0,16	0,19	0,22	0,25
	гравій	0,17	0,19	0,21	0,25	0,29

6.4 Рекомендовані допустимі напруження стискання ґрунту на основній площадці земляного полотна

Рекомендовані допустимі напруження стискання ґрунту на основній площадці земляного полотна $[\sigma_{оп}]$ приймаються за таблицею 6.5.

Таблиця 6.5 – Рекомендовані допустимі напруження на основній площадці земляного полотна

Вид рухомого складу	$[\sigma_{оп}]$, МПа, при вантажонапруженості				
	>80	40–80	40–25	25–10	<10
Локомотиви	0,1	0,1	0,1	0,11	0,12
Вагони	0,08	0,08	0,08	0,09	0,1

7 ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ В ЕЛЕМЕНТАХ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ

7.1 Загальні положення

В загальному випадку несуча здатність окремих конструктивних елементів колії забезпечується за умови не перевищення розрахунковими напруженнями $\sigma^{розр}$ рекомендованих допустимих напружень $[\sigma]$ в цих елементах, тобто мають виконуватись вимоги:

$$\begin{cases} \sigma_{к-г}^{розр} \le [\sigma_{к-г}] \\ \sigma_{к-п}^{розр} \le [\sigma_{к-п}] \\ \sigma_{шп}^{розр} \le [\sigma_{шп}] \\ \sigma_{б}^{розр} \le [\sigma_{б}] \\ \sigma_{оп}^{розр} \le [\sigma_{оп}] \end{cases}, \qquad (7.1)$$

де $\sigma_{к-п}^{розр}, \sigma_{к-г}^{розр}, \sigma_{шп}^{розр}, \sigma_{б}^{розр}, \sigma_{оп}^{розр}$ – розрахункові значення напружень в кромці головки рейки, кромці підошви рейки, в шпалі, баласті та на основній площадці земляного полотна відповідно.

Умови міцності всієї конструкції залізничної колії оцінюються насамперед за міцністю основного несучого елемента верхньої будови колії, тобто за міцністю рейок, шляхом порівняння розрахункових напружень у рейках з допустимими значеннями.

За напруженнями, що виникають в інших елементах верхньої будови колії, тобто за напруженнями в шпалах, баласті, на основній площадці земляного полотна – оцінюється несуча здатність і здатність до нормальної експлуатації конструкції верхньої будови колії в цілому.

Деяке перевищення рекомендованих напружень в шпалах не є підставою для зниження швидкостей руху, але свідчить про відступи в нормальній експлуатації шпал і вказує на необхідність швидкого посилення колії.

Деякі перевищення допустимих напружень в баласті свідчать про відступи в нормальній експлуатації баласту і вказують на реальну імовірність накопичення остаточних деформацій в баластовому шарі, що призводить до додаткових робіт по виправці колії. Для попередження цього необхідно якнайшвидше посилення колії або обмеження динамічних впливів на колію шляхом зниження швидкостей руху або величини осьових навантажень.

7.2 Умови міцності ланкової конструкції колії

Умови міцності для ланкової конструкції колії визначаються шляхом порівняння отриманих розрахунком значень напружень в елементах верхньої будови колії із допустимими.

Допустимі напруження для рейок ланкової колії слід приймати по зоні підошви за таблицями 6.1 і 6.2.

При розрахунку на міцність ланкової колії температурні напруження в рейках безпосередньо не враховуються внаслідок їхньої малості порівняно з безстиковими плітями.

Допустимі напруження в шпалах приймаються за розділом 6.2.

Допустимі напруження в баласті приймаються за розділом 6.3.

Допустимі напруження на основній площадці земляного приймаються за розділом 6.4.

7.3 Умови міцності безстикової конструкції колії

Виходячи з особливостей температурної роботи безстикової конструкції колії, ***умова міцності рейок*** буде мати вигляд:

$$\begin{cases} k_н \cdot \sigma_{к-п}^{(зима)} + \sigma_t \le \left[\sigma_{к-п}\right] \\ k_н \cdot \sigma_{к-г}^{(літо)} + \sigma_t \le \left[\sigma_{к-г}\right] \end{cases}, \qquad (7.2)$$

де $k_н$ – коефіцієнт неврахованих факторів, приймається рівним ($к_н$=1,3 для нових рейок, к$_н$=1,4 для старопридатних рейок);

$\sigma_{к-п}^{(зима)}$ – наявні (розрахункові) напруження згину в кромках підошви рейки взимку (беруться з практичних розрахунків ланкової колії на міцність);

$\sigma_{к-г}^{(літо)}$ – наявні (розрахункові) напруження згину в кромках головки рейки влітку (беруться з практичних розрахунків ланкової колії на міцність);

σ_t – температурні напруження в плітях безстикової колії ($\sigma_t = \alpha \cdot E \cdot \Delta t$).

Температурні напруження в плітях можуть бути визначені за загальновідомою залежністю:

$$\sigma_t = \alpha \cdot E \cdot \Delta t, \qquad (7.3)$$

де α=0,0000118 1/град – коефіцієнт лінійного розширення рейкової сталі;

E – 2,1·10^5 МПа – модуль пружності рейкової сталі;

Δt – зміна температури рейки відносно температури її закріплення.

У практичних розрахунках максимальний перепад температур Δt можна приймати рівним

$$\Delta t = \frac{T_A}{2} = \frac{t_{\max\max} - t_{\min\min}}{2}, \qquad (7.4)$$

де T_A –фактична річна температурна амплітуда рейок;

$t_{\max\max}$, $t_{\min\min}$ – найвища та найнижча температура рейок у відповідному кліматичному регіоні (приймаються за таблицею Д.1 додатку Д).

Для того, щоб забезпечувалась умова міцності безстикової колії (7.2) необхідно, щоб зміни температури рейкової плiті (відносно температури її закріплення) не перевищували б допустимих значень.

Допустимі, за умов міцності, зміни температури рейкової плiті, ºС, відносно температури закріплення можна визначити за формулами:

для умов літа (по міцності головки)

$$\Delta t_{МГ} = +\frac{[\sigma_{к-г}] - k_н \cdot \sigma_{к-г}^{(літо)}}{\alpha \cdot E}, \qquad (7.5)$$

для умов зими (по міцності підошви)

$$\Delta t_{МП} = -\frac{[\sigma_{к-п}] - k_н \cdot \sigma_{к-п}^{(зима)}}{\alpha \cdot E}, \qquad (7.6)$$

де $\Delta t_{МГ}, \Delta t_{МП}$ – допустимі зміни температури рейкової плiті відповідно в сторону збільшення (влітку) або в сторону зменшення (взимку);

$\sigma_{к-г}^{(літо)}$ – максимальні напруження згину в кромках головки рейок влітку (беруться з практичних розрахунків ланкової колії на міцність);

$\sigma_{к-п}^{(зима)}$ – те саме в кромках підошви рейки взимку (беруться з практичних розрахунків ланкової колії на міцність).

Напружений стан в інших конструктивних елементах колії оцінюється аналогічно з ланковою конструкцією розділу 7.2.

8 РОЗРАХУНОК БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ НА СТІЙКІСТЬ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ УМОВ ЇЇ УКЛАДАННЯ І ЕКСПЛУАТАЦІЇ

8.1 Загальні положення

Як вже зазначалося в розділі 5 в рейкових плітях безстикової колії при зміні температури природного навколишнього середовища, внаслідок наявності нерухомої ділянки, виникають значні за своєю величиною температурні напруження. Стискуючі сили при досягненні певної величини можуть викликати різку втрату стійкості рейко-шпальної решітки в горизонтальній або вертикальній площині, тобто викид колії.

Для попередження цього небезпечного явища в загальному випадку необхідно на першому етапі визначити найбільш допустиме значення поздовжньої температурної сили $[P_{t-c}]$ (при якій можлива втрата стійкості), а потім допустиме (за умовами стійкості) підвищення температури рейкової плiті відносно температури її закріплення $[\Delta t_c]$, яке можна обчислити як

$$[\Delta t_c] = \frac{P_{t-c}}{2\alpha \cdot E \cdot F}, \qquad (8.1)$$

де P_{t-c} – допустима температурна сила, Н;

E – модуль пружності рейкової сталі;

F – площа перерізу рейки, м^2 (наприклад, для нових рейок Р65 F =82,56 $\cdot$ 10^{-4} м^2).

При вирішенні цієї задачі мають місце два підходи: аналітичний і експериментальний. Відомі два основних методи аналітичного визначення сили, при якій відбувається втрата стійкості: енергетичний метод і метод диференціальних рівнянь. Перший, найбільш розповсюджений, побудований на законі збереження енергії, тобто рівності робіт зовнішніх і внутрішніх сил на ділянці рейкової пліті, що деформується. Другий метод, в якому рейко-шпальна решітка розглядається як балка на суцільній пружній основі, що знаходиться в умовах поздовжньо-поперечного згину.

У вітчизняній практиці розрахунків безстикової колії на стійкість зараз застосовують зазвичай три методи:

- метод К. М. Міщенка;
- метод С. П. Першина;
- метод Є. М. Бромберга.

8.2 Розрахунок на стійкість за методом. К. М. Міщенка

Допустима максимальна температурна сила визначається за виразом

$$[P_{t-c}] = \frac{P_к}{1,2}, \qquad (8.2)$$

де $P_к$ – поздовжня критична сила, при якій можлива втрата стійкості;

1,2 – коефіцієнт запасу.

Величину поздовжньої критичної сили $P_к$, довжину викривленої ділянки колії l_K та стрілу згину f_K в прямій можна визначити за формулами:

$$P_k = \frac{\eta_1}{\sqrt[4]{n}} \cdot \sqrt[4]{I_{(ршр)_Г} \cdot \omega \cdot E^2 \cdot q^2}\,; \tag{8.3}$$

$$l_K = \eta_2 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_{(ршр)_Г}}{P_K}}\,; \tag{8.4}$$

$$f_K = \eta_3 \cdot \sqrt{n \cdot \frac{I_{(ршр)_Г}}{\omega}}\,, \tag{8.5}$$

де η_1, η_2, η_3 – постійні коефіцієнти, що залежать від форми згину рейко-шпальної решітки (при однохвильовому згині $\eta_1 = 2,416$, $\eta_2 = 19,18$, $\eta_3 = 2,88$; при S-подібній формі згину $\eta_1 = 2,68$, $\eta_2 = 13,92$, $\eta_3 = 4,18$; рисунок 8.1 *а, б*);

n – поправочний коефіцієнт, що враховує дію поздовжніх сил на прилеглих до викривлення ділянках;

$$n = 1 + \frac{P_K}{4 \cdot p \cdot l_K}\,,$$

де p – погонний опір поздовжньому переміщенню рейко-шпальної решітки, Н/м;

$I_{(ршр)_Г}$ – момент інерції рейко-шпальної решітки в горизонтальній площині, м^4; можна приймати:

- при залізобетонних шпалах – $I_{(ршр)_Г} = 5 \cdot I_Г$;
- при дерев'яних шпалах, роздільному скріпленні – $I_{(ршр)_Г} = 4 \cdot I_Г$;
- при дерев'яних шпалах, змішаному скріпленні – $I_{(ршр)_Г} = 3 \cdot I_Г$;

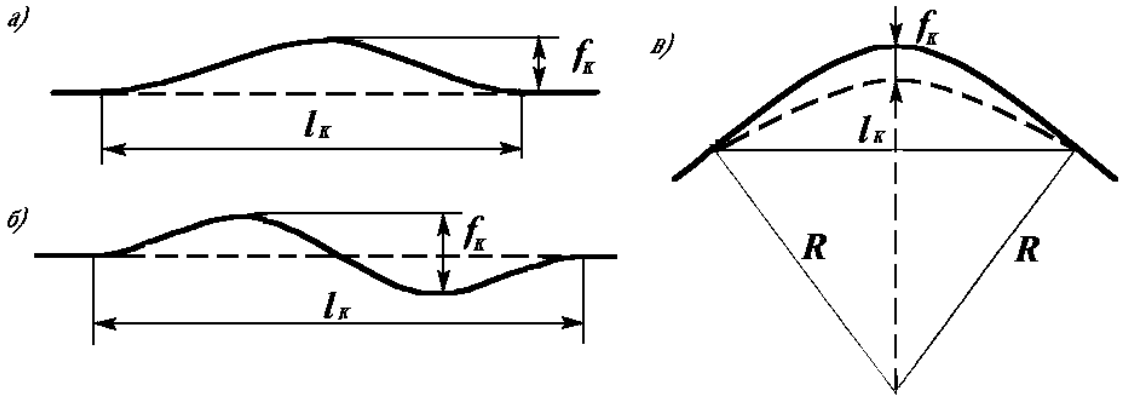
де $I_Г$ — момент інерції поперечного перерізу рейки у горизонтальній площині (таблиця Б.1);

ω – площа поперечного перерізу двох рейок, м^2 (таблиця Б.1);

E – модуль пружності рейкової сталі ($E = 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа);

q – погонний опір поперечному переміщенню рейко-шпальної решітки, Н/м.

При епюрі укладання шпал 1840 шт/км $p = 13 кг/см$, $q = 8{,}5\ кг/см$, при епюрі 2000 шт/км $p = 14 кг/см$, $q = 9\ кг/см$.



а – однохвильова форма згину; *б* – двохвильова (S-подібна) форма згину; *в* – форма згину в кривій

Рисунок 8.1 – Схеми викривлення колії при викиді колії

Для кривих ділянок колії величина критичної сили колії (рисунок 8.1, в) визначається за формулою

$$P_k = R \cdot \left(q - \frac{P_K^2 \cdot \sqrt{n}}{7{,}18 \cdot E \cdot \sqrt{I_{(рщр)_Г} \cdot \omega}} \right), \qquad (8.6)$$

де R — радіус кривої, м.

Довжина викривленої ділянки колії та стріла згину визначаються за раніше приведеними формулами (8.4) і (8.5). Критична сила за формулами (8.3) і (8.6) визначається підбором. Задаються значенням P_K обчислюють l_K. Підставляючи отримане значення l_K і P_K (яким задавалися) у формулу для обчислення P_K, одержують кілька значень $l_K = \varphi(P_K)$ і $P_K = f(l_K)$, за якими будують два графіки (рисунок 8.2). Точка їхнього перетину дає шукану величину P_K і l_K – загальні корені рівнянь (8.4) і (8.5). Отримані значення перевіряють, підставляючи у вирази (8.4) або (8.5) і, якщо розбіжність не перевищує 2 %, то розрахунок закінчують.

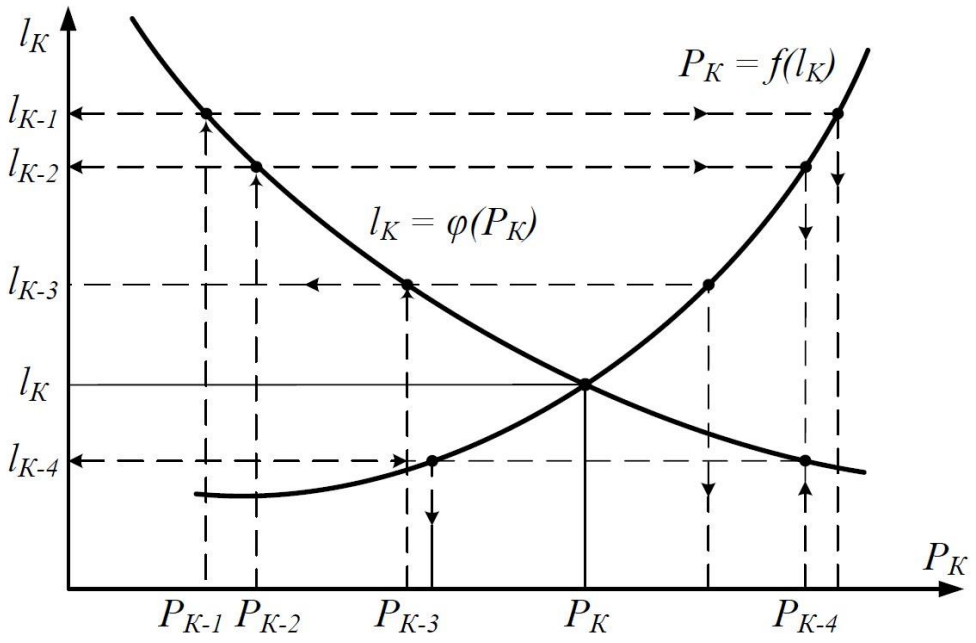


Рисунок 8.2 – Графічне визначення критичної сили та довжини викривленої ділянки колії за методом К. М. Міщенка

8.3 Розрахунок на стійкість за методом С. П. Першина

Допустима поздовжня сила за умовами стійкості дорівнює

$$[P_{t-c}] = \frac{P_{закр}}{K_з}, \tag{8.7}$$

де $P_{закр}$ – закритична поздовжня сила, при якій можлива втрата стійкості;

$K_з$ — коефіцієнт запасу за стійкістю (приймають $K_y = 1,5 \div 2,0$ залежно від плану лінії).

На основі енергетичних умов рівноваги із врахуванням нелінійності опору деформаціям зі сторони баластного шару і вузлів проміжних рейкових скріплень, а також наявності початкових нерівностей колії, С. П. Першин запропонував спрощену формулу для визначення, закритичної сили $P_{закр}$:

$$P_{закр} = \frac{A}{i^{\alpha}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \tag{8.8}$$

де A та α – параметри, які залежать від типу рейки і плану лінії (таблиця 8.1);

i – середній ухил початкової нерівності, ‰ (для прямих – i = 2 ‰, для кривих – i = 2,5–3 ‰);

K_1 – коефіцієнт, який залежить від опору Q баласту зміщенню шпали (приймається за рисунком 8.3).

K_2 – коефіцієнт, який залежить від епюри шпал (приймається рівним 0,9, 1,0, 1,08 відповідно при 1600, 1840, 2000 шпал на 1 км);

K_3 – коефіцієнт, який залежить від величини затягування гайок клемних болтів (приймається за рисунком 8.4).

Таблиця 8.1 – Параметри A і α для визначення закритичної сили $P_{закр}$

R, м	A*			α		
	Р50	Р65	Р75	Р50	Р65	Р75
400	2,38	2,48	2,56	0,300	0,232	0,175
600	2,95	3,15	3,21	0,365	0,335	0,290
800	3,32	3,61	3,76	0,410	0,385	0,350
1000	3,60	3,83	4,18	0,450	0,410	0,385
∞ (пряма)	5,17	5,83	6,50	0,600	0,585	0,560
Примітка – * Величина параметру A приведена для визначення P_3 в МН						

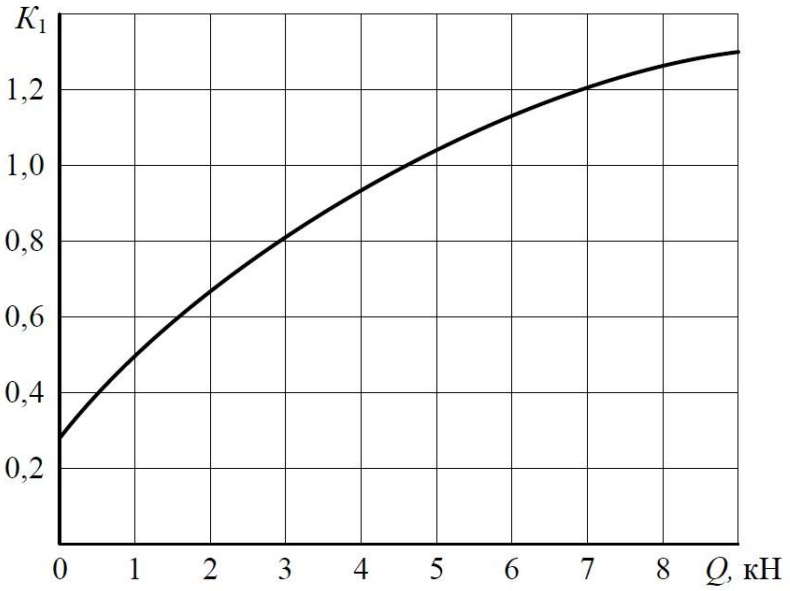


Рисунок 8.3 –Зміна коефіцієнту K_1 залежно від опору баласту зміщенню в ньому шпал Q

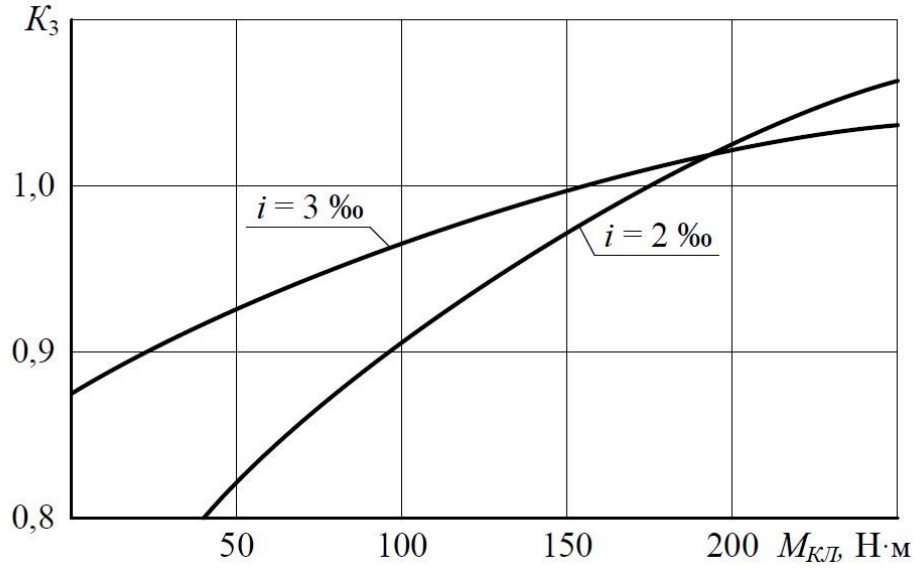


Рисунок 8.4 – Зміна коефіцієнту $K_З$ залежно від затягування гайок клемних болтів

Опір зсуву шпал залежить від ступеня ущільнення баласту, матеріалу і форми шпал. Ущільнення баласту можна оцінити або за кількості вантажу, що пройшов по колії, або тривалістю підбивання шпал електрошпалопідбійками чи ущільнення іншими механізмами. Так, при ущільненні електрошпалопідбійками $Q = 4,4$ кН, при ущільненні колійними машинами $Q = 6,0$ кН, після обкатування $Q = 8,0 \div 9,0$ кН. За відсутності баласту в шпальних ящиках $Q = 3,5 \div 3,7$ кН.

8.4 Розрахунок на стійкість за емпіричною формулою Є. М. Бромберга

Унаслідок численних багатоваріантних експериментів на спеціальному стенді з дослідження процесу втрати стійкості безстикової конструкції колії Є. М. Бромбергом була одержана емпірична залежність допустимої поздовжньої температурної сили P_{t-c} для типових конструкцій безстикової колії з урахуванням плану лінії

$$P_{t-c} = [P_K]_\infty \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 - \frac{A}{R}\ , \qquad (8.9)$$

де $[P_K]_\infty$ — критичне значення поздовжньої сили, допустиме в прямій ділянці колії;

η_1 —коефіцієнт, що враховує тип рейки;

η_2 —коефіцієнт, що враховує епюру шпал;

A —коефіцієнт, що залежить від типу рейки і епюри шпал;

R —радіус кривої, м.

Для практичних розрахунків величини, що входять в формулу (8.9), слід приймати за таблицею 8.2.

Таблиця 8.2 – Коефіцієнти для обчислення допустимої температурної сили для типових конструкцій колії

Тип рейки	Тип шпал	Епюра шпал	$[P_K]_\infty \cdot \eta_1 \cdot \eta_2$, МН		A, МН·м
			щебінь	азбест	
Р75	з/б	2000	2,76	2,59	424
		1840	2,56	2,45	384
	дер.	2000	2,40	2,32	386
		1840	2,22	2,15	336
Р65	з/б	2000	2,44	2,29	396
		1840	2,24	2,14	364
	дер.	2000	2,10	2,03	336
		1840	1,95	1,89	312
Р50	з/б	2000	2,19	2,06	356
		1840	2,02	1,93	328
	дер.	2000	1,90	1,84	308
		1840	1,75	1,40	284

8.5 Визначення температурних умов укладання й експлуатації безстикової колії

Можливість укладання безстикової колії, особливості її конструкції і методи утримання визначаються на основі зіставлення допустимої температурної амплітуди рейки [T] та фактичної річної температурної амплітуди T_A.

Значення T_A визначається як алгебраїчна різниця між найвищою $t_{\max\max}$ і найнижчою $t_{\min\min}$ температурою рейки, які принаймні коли-небудь спостерігались в цьому кліматичному районі [1]

$$T_A = t_{\max\max} - t_{\min\min}, \tag{8.10}$$

$t_{\max\max}$, $t_{\min\min}$ приймаються за таблицею Д.1 додатку Д.

Допустиму температурну амплітуду рейок [T] можна визначити як

$$[T] = [\Delta t_p] + [\Delta t_c] - [\Delta t_з], \tag{8.11}$$

де $[\Delta t_p]$ – допустиме зниження температури рейкової плiті відносно температури її закріплення за умовою міцності підошви рейки;

$[\Delta t_c]$ – допустиме підвищення температури рейкової плiті відносно температури її закріплення за умовою міцності головки рейки або за умовою стійкості проти викиду;

$[\Delta t_з]$ – мінімальний інтервал температур, в якому остаточно закріплюються плiті (за умовами проведення робіт для розрахунків він приймається 10 °С, але за необхідності його можна зменшити до 5 °С, якщо передбачити закріплення плітей восени або в хмарну погоду, або в

ранні ранкові години або у вечірні години, коли температура рейкових плітей в ході закріплення змінюється повільно).

Розрахункові допустимі зниження $\left[\Delta t_p\right]$ і підвищення $\left[\Delta t_c\right]$ температури рейкової пліті визначають з урахуванням таких умов:

$$\left[\Delta t_p\right] = \Delta t_{МП} \ , \tag{8.12}$$

$$\left[\Delta t_c\right] = \min \begin{cases} \Delta t_{МГ} + 6°C \\ \Delta t_y \end{cases} . \tag{8.13}$$

Вираз (8.13) означає, що допустима величина зміни температури рейкової пліті за дії стискаючих сил визначається мінімальним значенням, яке отримане за умовою міцності $\Delta t_{МГ} + 6°C$ або за умовою стійкості колії проти викиду Δt_y.

Для типових конструкцій колії залежно від плану лінії та умов експлуатації значення $\left[\Delta t_p\right]$ і $\left[\Delta t_c\right]$ наведені в таблиці Г.1.

В інших випадках $\Delta t_{МП}$, $\Delta t_{МГ}$ визначають за розділом 7.3, а $\left[\Delta t_c\right]$ відповідно до вимог розділів 8.2-8.4.

Якщо

$$\left[T\right] \geq T_A \ , \tag{8.14}$$

то допустиме укладання і експлуатація безстикової колії температурно-напруженого типу без сезонних розрядок температурних напружень.

У цьому випадку, виходячи з фактичної температурної амплітуди T_A, знаходять розрахунковий температурний інтервал укладання і закріплення пліті безстикової колії $\Delta t_з$ за формулою

$$\Delta t_з = \left[\Delta t_p\right] + \left[\Delta t_c\right] - T_A \ . \tag{8.15}$$

Межі інтервалу закріплення, тобто найнижча температура інтервалу $\min t_з$ і верхня межа $\max t_з$ (рисунок 8.5) визначаються за формулами:

$$\left.\begin{aligned} \min t_з &= t_{\max\max} - [\Delta t_c] \\ \max t_з &= t_{\min\min} + [\Delta t_p] \end{aligned}\right\} \qquad (8.16)$$

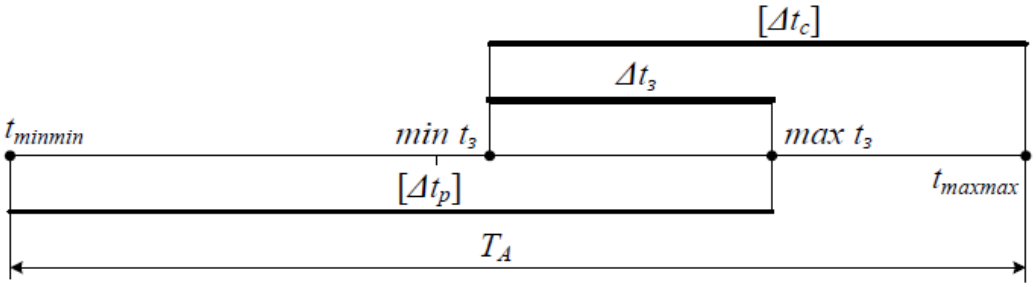


Рисунок 8.5 – Діаграма температурної роботи безстикової колії

Якщо за розрахунком $T_A > [T]$, то експлуатувати в таких умовах безстикову колію без проведення сезонних (періодичних) розрядок напружень в рейкових плітях не дозволяється. Як показали досвід експлуатації і розрахунки [2, 3], застосування безстикової колії з сезонними розрядками напружень менш ефективне, ніж застосування безстикової колії без сезонних розрядок напружень, оскільки трудомісткість її утримання вище (на весняну і осінню розрядки напружень необхідно 25-30 люд-дн/км).

Крім цього, роботи по розрядці напружень співпадають з іншими роботами з поточного утримання колії, що викликані переходом колії з зимового у літній (і навпаки) стан, що потребує великої мобілізації засобів і сил представників колійного господарства, які зайняті поточним утриманням.

Якщо за розрахунком $T_A > [T]$, то необхідно, насамперед, перевірити і уточнити величини максимальних швидкостей руху поїздів з

урахуванням тягових розрахунків і перевіркою умов комфортабельності їзди пасажирів, а також безпеки руху за умовами стійкості колії від сходження при накатуванні гребня колеса на головку рейки і при зсуві рейко-шпальної решітки під дією найбільших бічних сил. Якщо при цьому розрахункова амплітуда [*T*], що знайдена для найменшої з визначених значень швидкості руху, виявляється менше фактичної T_A, то можливість улаштування безстикової колії визначається після аналізу даних, що отримані в результаті використання таких рішень:

а) перехід до більш потужної конструкції колії, наприклад заміна рейки на більш важку, заміна дерев'яних шпал на залізобетонні, посилення епюри шпал. Напруження $\sigma_{к-п}$ і $\sigma_{к-г}$ при цьому зменшуються і, якщо навіть Δt_c зміниться незначно, то значення Δt_p збільшиться суттєво;

б) зменшення максимальних швидкостей руху за найбільш низьких температур. Якщо неможливо укладати більш потужну конструкцію колії, а розрахунковий температурний інтервал недостатній, тобто $\Delta t = T_A - [T] = 8 - 10$ °С, то доцільне рішення, при якому побудова діаграми температурної роботи безстикової колії аналогічне викладеному вище, але замість $t_{\min\min}$ відкладається значення $t_{\min\min} + \Delta t$. Використання такого прийому дає змогу збільшити на *Δt* температурний інтервал закріплення, що стає рівним мінімальному рекомендованому значенню – 10°С (рисунок 8.6).

У випадку, що розглядається, необхідно визначити значення швидкостей руху, які можна допустити при пониженні температури рейкової плиті нижче Δt_{p-1} – температури, за якої можливо реалізувати максимальні швидкості руху, оскільки Δt_p визначено саме за цієї умови.

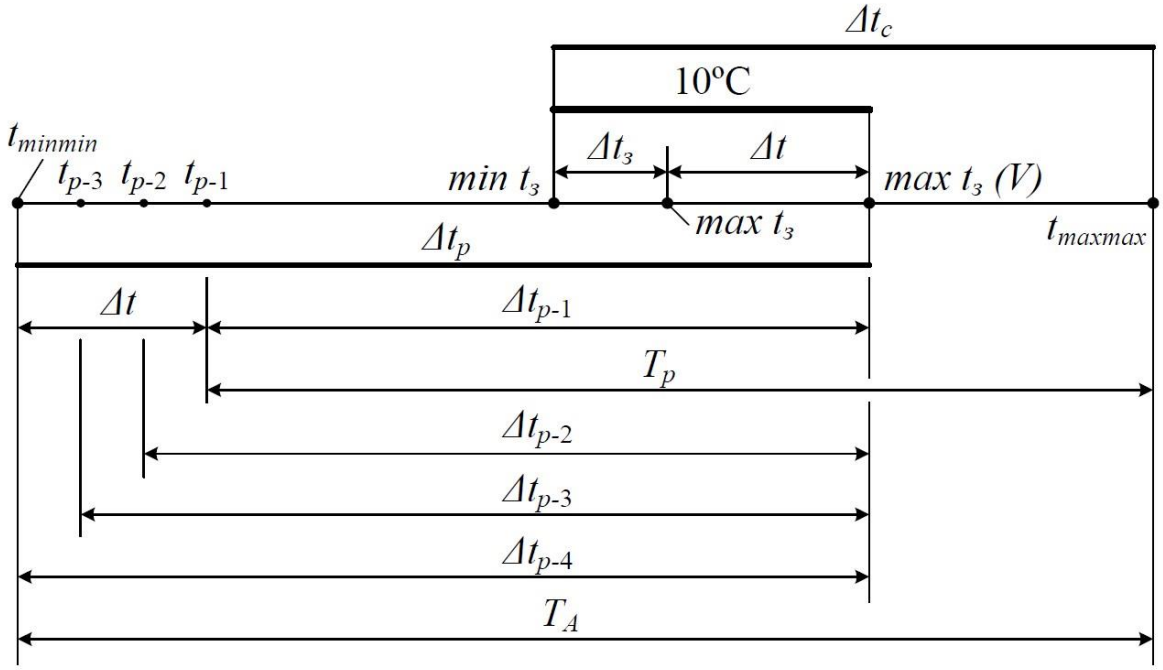


Рисунок 8.6 – Діаграма температурної роботи безстикової колії при $T_A > [T]$

Максимальна температура закріплення плітей визначається за формулою

$$\max t_{з\,(V)} = \min t_з + 10\,. \tag{8.17}$$

Температура рейкових плітей Δt_{p-1} дорівнює

$$\Delta t_{p-1} = \max t_{з\,(V)} - \Delta t_p\ . \tag{8.18}$$

Величини швидкості для температур нижче Δt_{p-1} визначаються виходячи з того, що зниження температури на 1 °С тягне за собою зниження швидкості руху поїздів в середньому близько 5 км/год. Приймаючи це рішення (практично можна цілорічно експлуатувати безстикову колію цієї конструкції в районі, де мінімальні температури нижче гранично допустимих), залізниця вимушена буде обмежувати

максимальні швидкості руху по цих ділянках в окремі (зазвичай короткострокові) періоди часу (які повторюються далеко не кожну зиму), коли фактична температура рейок опускається нижче Δt_{p-1}.

При встановленні способу експлуатації безстикової колії враховується, що конструкція колії і прийнятий спосіб її утримання мають забезпечувати можливість руху з максимальними швидкостями не тільки рухомого складу, що пересувається, але і того, що буде введений в найближчий перспективі.

Крім того, спосіб експлуатації безстикової колії може змінюватися на суміжних ділянках, що відрізняються планом або профілем, а також швидкостями руху. Не допускається укладання безстикової колії на неоздоровленному земляному полотні.

При остаточному вирішенні питання про обмеження швидкості руху поїздів необхідно визначити витрати, що пов’язані зі зниженням швидкості, а також з виконанням робіт із сезонних розрядок температурних напружень, щоб порівняти їх між собою, і тільки після цього можна приймати рішення. При цьому необхідно пам’ятати, що в кожному конкретному випадку обмеження швидкості необхідно назначати для кожної категорії поїздів окремо, оскільки можливо, що для деяких з них обмеження взагалі не буде потрібно.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Даніленко Е. І., Рибкін В. В. Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість. Київ: Транспорт України. 2006. 168 с.

2 Даніленко Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом: підручник: у 2 т. Київ: Інпрес, 2010. Т. 1. 528 с.

3 Даніленко Е. І. Залізнична колія. Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомим складом: підручник: у 2 т. Київ: Інпрес, 2010. Т. 2. 456 с.

4 Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України / В. В. Рибкін, О. М. Патласов, О. І. Бєлорусов, М. І. Карпов, Д. М. Курган, В. П. Шраменко. Київ: НВП Поліграфсервіс, 2012. 152 с.

5 Правила технічної експлуатації залізниць України. Київ: ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2003. 133 с.

6 Шраменко В. П. Улаштування та експлуатація безстикової колії з рейковими плітями необмеженої довжини: навч. посіб. Харків: УкрДАЗТ, 2002. 127 с.

РОЗРАХУНОК ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ
НА МІЦНІСТЬ І СТІЙКІСТЬ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до дипломного та курсового проєктування

з дисципліни
«ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ (СПЕЦКУРС)»

Частина 1

Відповідальний за випуск Вітольберг В. Г.

Підписано до друку 05.06.2024 р.
Умовн. друк. арк. 3,75. Тираж . Замовлення № .
Видавець та виготовлювач Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018