

## РОЗДІЛ 4

### ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ВЗАЄМОДІЇ ВАГОНА З РЕЙКОВОЮ КОЛІЄЮ В МІСЦІ ІЗОЛЬОВАНОЇ СТИКОВОЇ НЕРІВНОСТІ

#### **4.1 Кінематичні характеристики ударної взаємодії вагона з приймаючою рейкою в місці стику**

Базовими динамічними характеристиками ударної взаємодії вагона з приймаючою рейкою для стику типу "зазор – ступінь вниз" є: величина доударної швидкості  $V_{01}$  колеса вагона (на заключній ділянці фази балістичного руху) в момент торкання їм рейки; лінійна координата механічного контакту колеса з приймаючою рейкою: горизонтальна координата  $l^*$  прикладення ударного імпульсу впливу до рейки, відлічувана від його торця. При цьому від величини  $V_{01}$  і  $l^*$  залежать, з огляду на рівняння (3.16), (3.23) даної роботи прогини рейки колії по довжині, що є найважливішою характеристикою безперебійного і безпечного руху рейкового транспорту.

*Дослідження параметрів ударної взаємодії колеса вагона з приймаючою рейкою на фазі балістичного руху*

Розглянемо величину доударної швидкості  $V_{01}$  і установимо її залежність від жорсткості  $c$  підвіски, завантаження  $m_2$  вагона, швидкості  $V_x$  руху вагона і висоти  $h$  стикової нерівності.

У розділі 3.1 роботи показано, що під час проходження колісною парою стикової нерівності рейкової колії, вона робить балістичний рух, що почнеться в момент відриву колісної пари від віддаючої рейки і закінчиться моментом її торкання з приймаючою рейкою. Отриману колесом вертикальну швидкість за час даного руху знайдемо зі співвідношення (3.45).

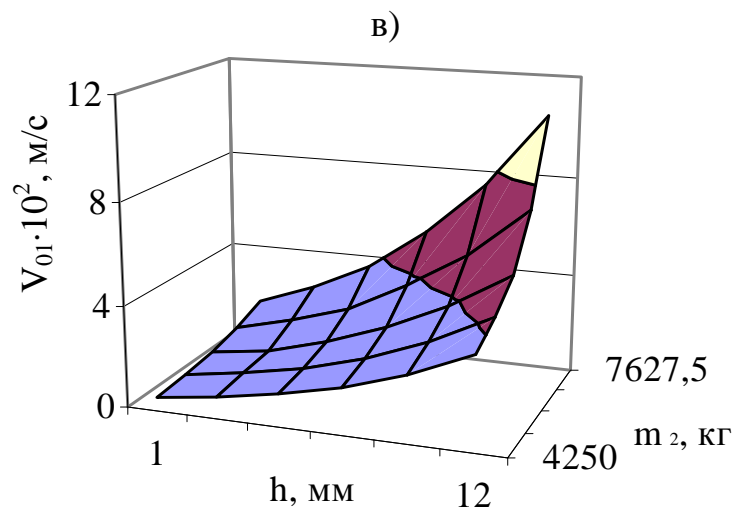
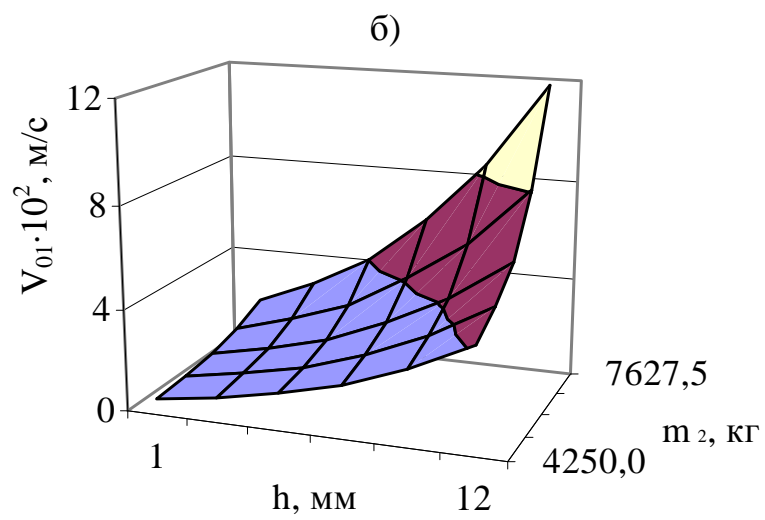
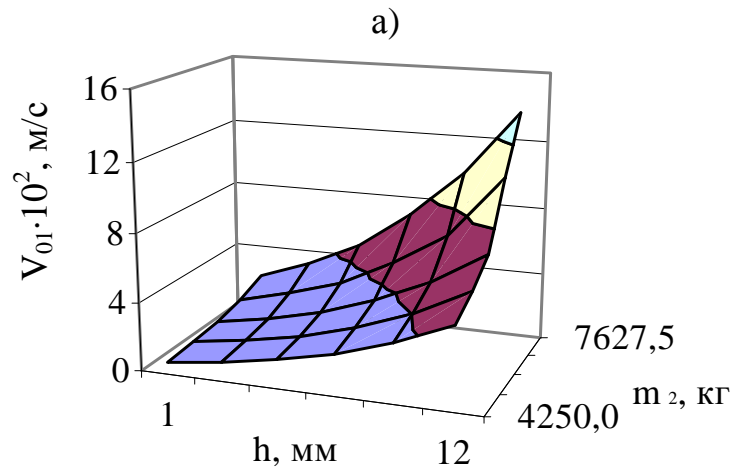


Рис. 4.1. Дударна швидкість  $V_{01}$  при жорсткості амортизатора  $c = \text{Var}$

На рис. 4.1, а,б,в представлені залежності вертикальної доударної швидкості  $V_{01}$  колеса від завантаження вагона  $m_2 = [4250 \div 7627,5]$  кг і висоти стику  $h = [1 \div 12]$  мм при різних значеннях жорсткості підвіски: на рис. 4.1,а приведена залежність при жорсткості  $c = 4 \cdot 10^5$  Н/м, на рис. 4.1,б – при  $c = 8,0 \cdot 10^5$  Н/м, а на рис. 4.1,в – при  $c = 12 \cdot 10^5$  Н/м.

Аналіз приведених на рис. 4.1,а,б,в залежностей  $V_{01}$  ( $m_2$ ,  $c$ ,  $h$ ) дозволяє зробити наступні висновки:

– при зміні швидкості вагона в діапазоні  $V_{01} [0,71 \div 13,6]$  м/с і його завантаження  $m_2 = [4250 \div 7627,5]$  кг, а також  $h = [1 \div 12]$  мм доударна швидкість  $V_{01}$  є монотонно зростаючою функцією параметрів  $m_2$ ,  $h$ ;

– збільшення жорсткості  $c$  підвіски вагона приводить до зниження величини доударної швидкості: наприклад, для порожнього вагона варіація жорсткості в діапазоні  $c = [4 \cdot 10^5 \div 12 \cdot 10^5]$  Н/м при  $h = 12$  мм обумовлює зміну доударної швидкості в діапазоні  $V_{01} = [4,81 \div 3,647]$  м/с, тобто її зниження в 1,31 рази. Слід зазначити, що при максимальному завантаженні вагона для тих же значень  $c$  і  $h$  зниження величини доударної швидкості складає аналогічно 31%.

На рис. 4.2,а,б,в приведені залежності доударної швидкості  $V_{01}$  від жорсткості амортизатора  $c$ , висоти стику  $h$  при зміні завантаження вагона: на рис. 4.2,а приведена залежність для порожнього вагона ( $m_2 = 4250$  кг), на рис. 4.2,б – залежність для  $m_2 = 6266,5$  кг, на рис. 4.2,в – при максимальному завантаженні ( $m_2 = 7225$  кг).

Представлені на рис. 4.2,а,б,в залежності  $V_{01}$  ( $c$ ,  $h$ ,  $m_2$ ) доударної швидкості показують, що вони носять: при  $c = \text{const}$ ,  $m_2 = \text{const}$  і  $h = \text{Var}$  монотонно зростаючий характер, а при  $c = \text{const}$  і  $h = \text{const}$  – монотонно убутний. При цьому встановлено наступне: збільшення завантаження вагона обумовлює зростання доударної швидкості  $V_{01}$ : наприклад, зміна маси  $m_2$  у діапазоні  $m_2 = [4250 \div 7627,5]$  кг при  $c = 8,0 \cdot 10^5$  Н/м і  $h = 12$  мм приводить до зростання доударної швидкості в діапазоні  $V_{01} = [4,15 \div 11,75]$  м/с у 2,83 рази.

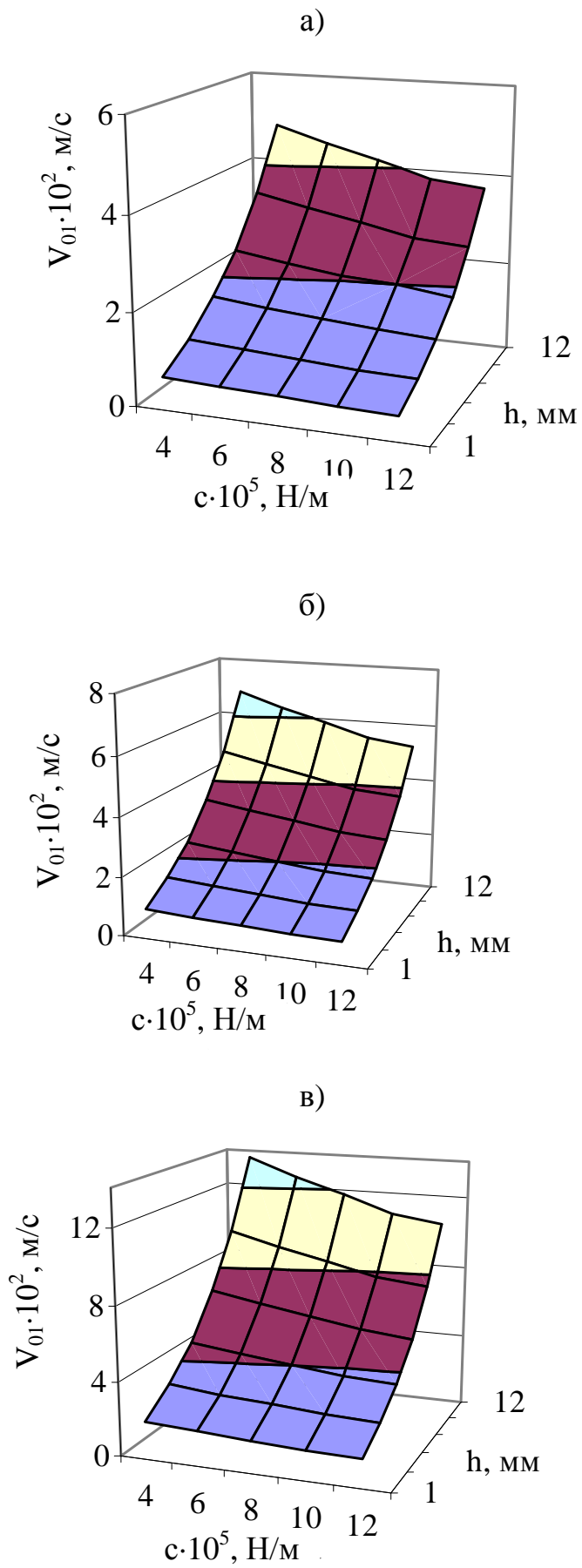


Рис. 4.2. Дударна швидкість  $V_{01}$  при завантаженні вагона  $m_2 = \text{Var}$

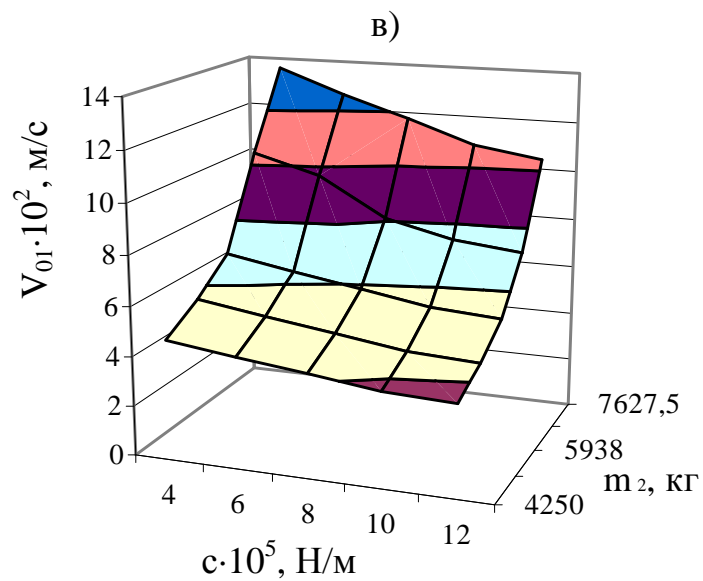
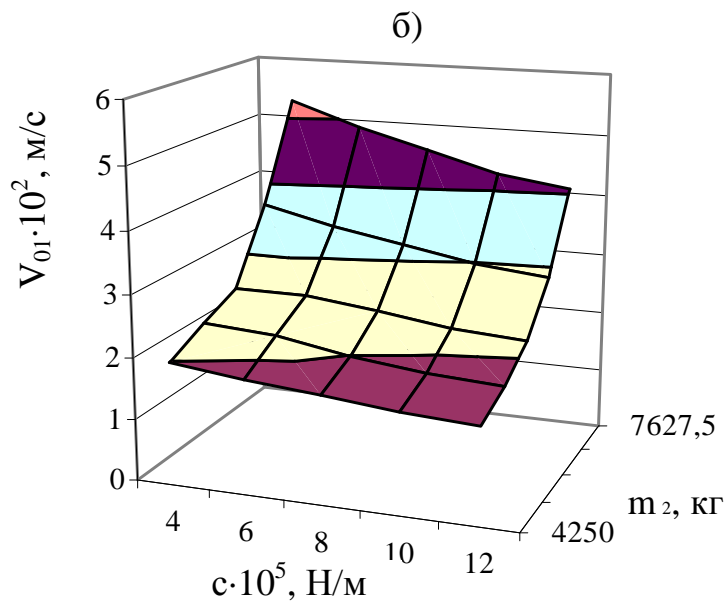
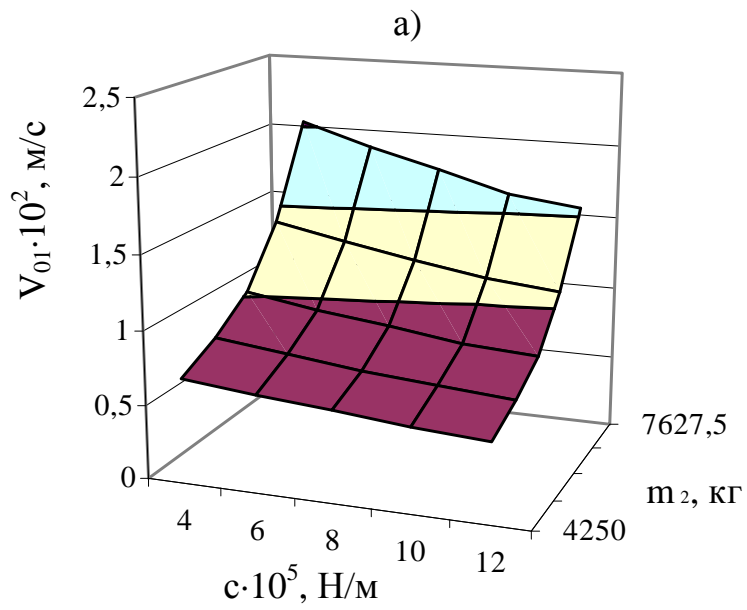


Рис. 4.3. Значення доударної швидкості  $V_{01}$  при  $h = \text{Var}$

На рис. 4.3,а,б,в представлені графічні залежності доударної швидкості  $V_{01}$  від жорсткості підвіски  $c$  і завантаження вагона  $m_2$ . На рис. 4.3,а приведена залежність для висоти стику  $h = 1$  мм; на рис. 4.3,б – залежність для  $h = 6,5$  мм, на рис. 4.3,в – залежність для висоти стику, рівної 12 мм.

Аналіз приведених на рис. 4.3,а,б,в залежностей  $V_{01}(m_2, c, h)$  показує наступне:

– при  $c = \text{const}$  вони носять монотонно зростаючий характер, при  $m_2 = \text{const}$  – монотонно убутний;

– збільшення завантаження вагона в діапазоні  $m_2 = [4250 \div 7627,5]$  кг при

$c = 8,0 \cdot 10^5$  Н/м і  $h = 12$  мм призводить до збільшення доударної швидкості в діапазоні  $V_{01} = [4,15 \div 11,75]$  м/с, тобто в 2,83 рази;

– при максимальному завантаженні вагона і  $c = 8 \cdot 10^5$  Н/м збільшення висоти стику в діапазоні  $h = [1 \div 12]$  мм обумовлює зміну (збільшення) доударної швидкості в діапазоні  $V_{01} = [1,75 \div 11,75]$  м/с, тобто в 6,71 рази.

#### *Горизонтальна координата $l^*$ ударного імпульсу*

Координата  $l^*$  прикладення в системі «вагон – рейка» ударного імпульсного впливу до приймаючої рейки залежить, з огляду на (3.44), від жорсткості підвіски і завантаження вагона, швидкості руху вагона, а також геометричних характеристик стику (висоти стику і зазору).

Залежності  $l^*(m_2, h)$  побудовані для  $V_x = 7,5$  м/с і зазорі стику  $\Delta = \bar{x} = 22,65$  мм (див. розділ 2.2). При цьому на рис. 4.4,а представлений графік–поверхня  $l^*(m_2, h)$  при  $c = 4 \cdot 10^5$  Н/м. Залежності на рис. 4.4,б,в побудовані для жорсткості амортизатора  $c = (8;12) \cdot 10^5$  Н/м.

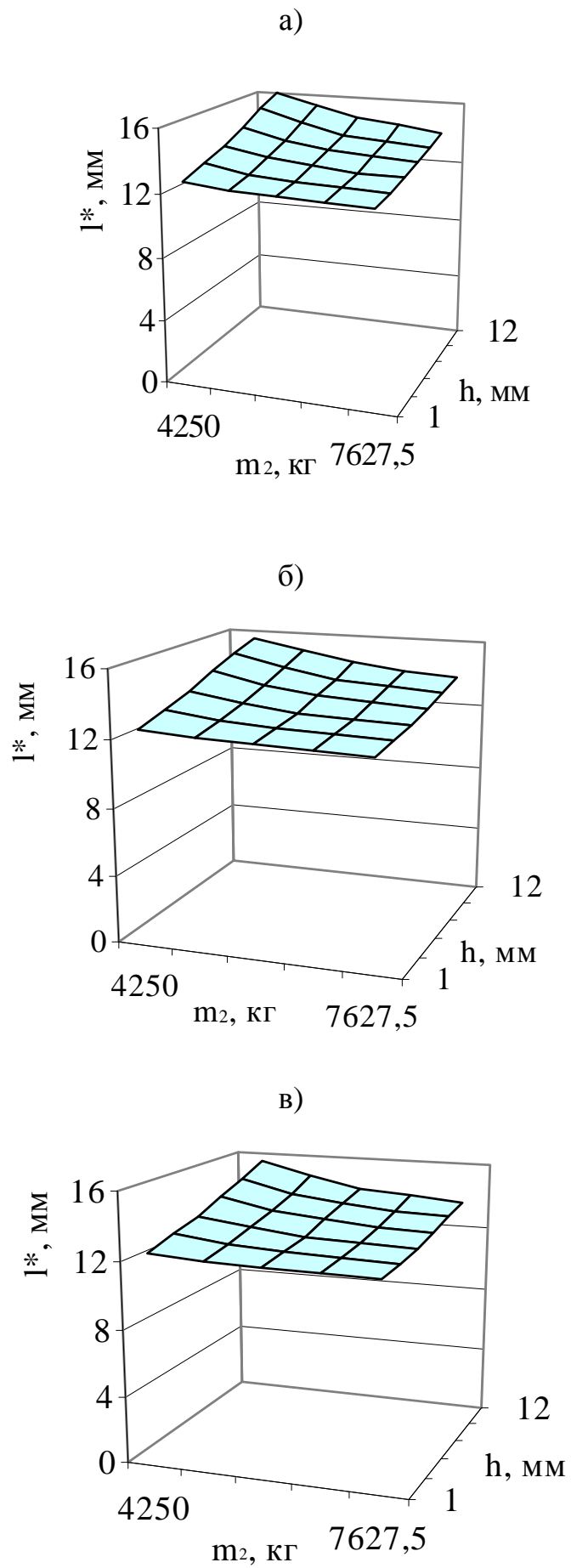


Рис. 4.4. Горизонтальна координата ударного імпульсу при  $c = \text{Var}$

Аналіз приведених на рис. 4.4,а,б,в залежностей дозволяє зробити наступні висновки:

– при зміні завантаження вагона і висоти стику в діапазонах  $m_2 = [4250 \div 7627,5]$  кг і  $h = [1 \div 12]$  мм координата  $l^*$  ударного імпульсу є монотонно убутною функцією параметрів  $m_2$  і  $h$  і змінюється при  $c = 4,0 \cdot 10^5$  Н/м у діапазоні  $l^* = [16,2 \div 12,3]$  мм;

– збільшення жорсткості  $c$  підвіски вагона приводить до зниження величини лінійної координати ударного імпульсу: наприклад, для максимально завантаженого вагона при  $c = [4 \div 12] \cdot 10^5$  Н/м одержимо  $l^* = [13,9 \div 13,5]$  мм.

На рис. 4.5,а,б,в приведені залежності  $l^*(c, h)$  при  $m_2 = \text{Var} = [7627,5; 6266,5; 4250]$  кг. При цьому встановлено, що вони носять при  $c = \text{const}$ ,  $m_2 = \text{const}$  і  $h = \text{Var}$  монотонно зростаючий характер, а при  $c = \text{Var}$  і  $h = \text{const}$  – монотонно убутний. Також отримано, що збільшення завантаження вагона призводить до зменшення координати  $l^*$ : наприклад, зміна маси  $m_2$  у діапазоні  $m_2 = [4250 \div 7627,5]$  кг при  $c = 8 \cdot 10^5$  Н/м і  $h = 12$  мм приводить до зменшення лінійної координати ( $l^* = [13,7 \div 15,8]$  мм) у 1,15 рази.

На рис. 4.6,а,б,в представлені залежності  $l^*(c, m_2)$  при  $h = \text{Var} = [1; 6,5; 12]$  мм.

Їхній аналіз показує наступне:

– при  $c = \text{const}$ ,  $m_2 = \text{Var}$  вони носять монотонно зростаючий характер, при  $c = \text{Var}$  і  $m_2 = \text{const}$  – монотонно убутний;

– збільшення завантаження вагона в діапазоні  $m_2 = [4250 \div 7627,5]$  кг при  $c = 8,0 \cdot 10^5$  Н/м і  $h = 12$  мм призводить до зменшення горизонтальної координати в діапазоні  $l^* = [15,8 \div 13,7]$  мм, тобто в 1,15 рази;

– при  $c = 8 \cdot 10^5$  Н/м і максимальному завантаженню вагона збільшення висоти стику в діапазоні  $h = [1 \div 12]$  мм обумовлює зміну (збільшення) горизонтальної координати ударного імпульсу в діапазоні  $l^* = [12,2 \div 13,7]$  мм, тобто в 1,12 рази.



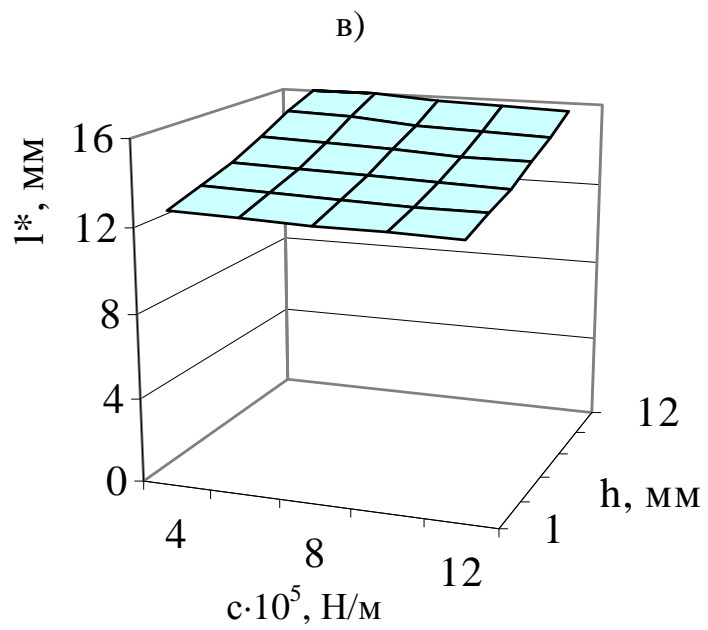
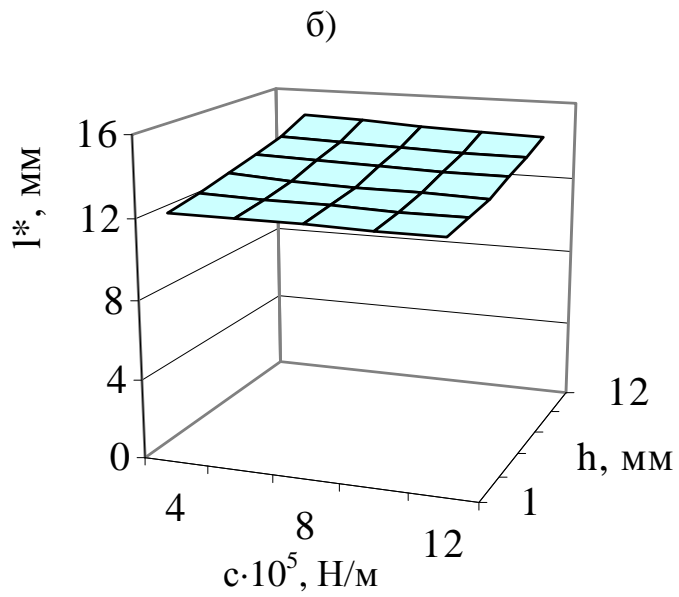
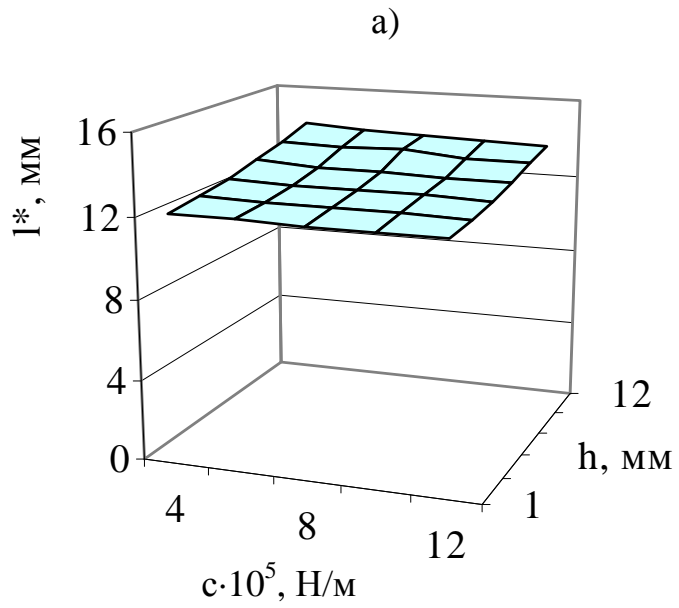


Рис. 4.5. Горизонтальна координата ударного імпульсу при  $m_2 = \text{Var}$

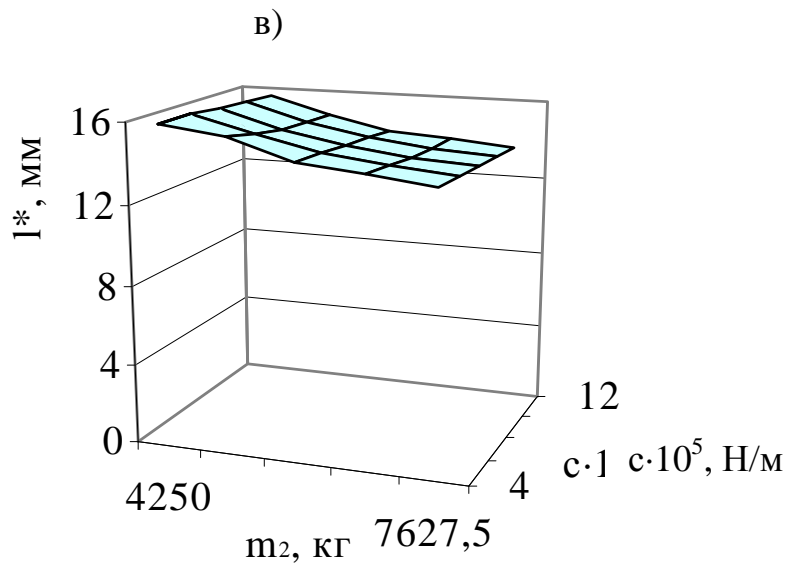
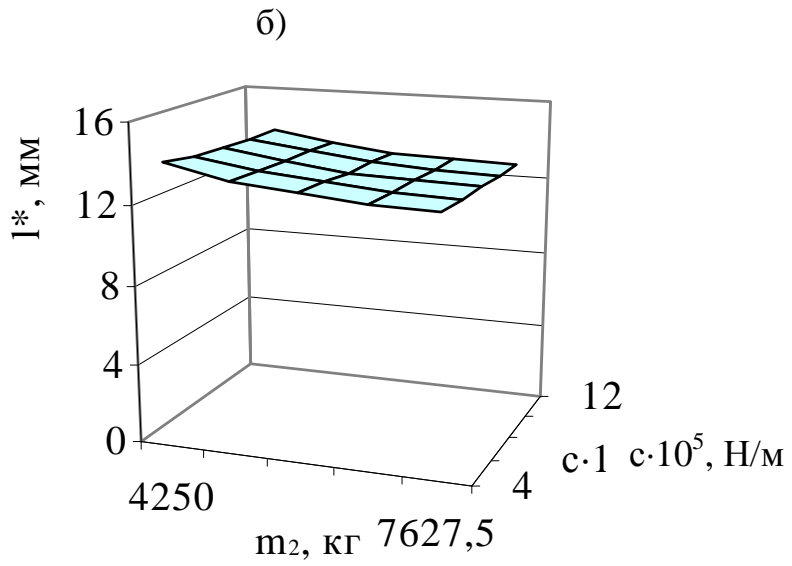
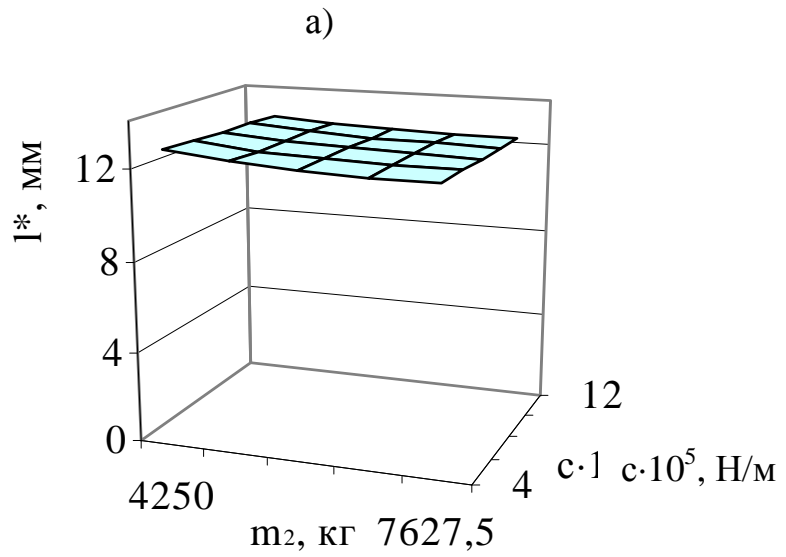


Рис. 4.6. Горизонтальна координата ударного імпульсу при  $h = \text{Var}$

Проведені в даній роботі дослідження й отримані при цьому чисельні значення доударної швидкості  $V_{01}$  і координати  $l^*$  ударного імпульсу, що прикладається до приймаючої рейки, використовуються надалі в розділі 4.3 дисертаційної роботи при визначенні впливу експлуатаційних і конструктивних параметрів вагона і верхньої будови колії на прогини приймаючої рейки в місці стику.

#### **4.2 Механічні характеристики взаємодії в системі «вагон – рейкова колія в місці стику» з урахуванням завантаження вагона, граничних умов закріплення приймаючої рейки, геометричних і механічних характеристик рейки, накладок стику, шпали і баластового шару**

Розглянемо механічну характеристику взаємодії в системі «вагон – рейкова колія в місці стику», а саме жорсткість приймаючої рейки на стику типу "зазор", механічна схема якого приведена на рис. 3.12, в залежності від геометричних, механічних і експлуатаційних факторів: завантаження вагона; нормованої сили ваги колеса; величини зазору стику  $\Delta$ ; жорсткості  $c_1$  баластового шару; умов закріплення лівого і правого кінців рейки (схеми 1,3,4,5 табл. 3.1).

При цьому геометричні і механічні характеристики двохголових накладок і рейки типу Р–65 відповідають наступним даним:

$$L_1 = 12,5 \text{ м}; l = 0,585 \text{ м}; E = 2,6 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2; J = 3573 \text{ см}^4; \rho = 7,8 \text{ кг/м}^3; \\ E_H = 2 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2; J_H = 766 \text{ см}^4; \rho_H = 7,8 \text{ кг/м}^3; F_H = 57 \text{ см}^2.$$

Дослідження проведемо на підставі виразів (3.47), (3.84)–(3.87).

На рис. 4.7 – 4.10 представлені зменшені в  $10^5$  разів характеристики жорсткості приймаючої рейки на кінці (індекс «р.к»)  $c_{p.k.}$  ( $c_1$ ,  $\Delta$ ) при  $L = 12,5 \text{ м}$  і  $N = 23 \text{ м}$ . Аналіз графіків дозволяє зробити наступні висновки:

– умови закріплення приймаючої рейки на правому кінці практично не роблять впливу на його жорсткість на лівому кінці: наприклад, варіація зазору стику в діапазоні  $\Delta = [1 \div 60]$  мм, а також жорсткості баластового шару в діапазоні  $c_1 = [2 \div 10] \cdot 10^5$  Н/м для схем закріплення 1,5 і 3,4 дає при однакових заданих значеннях  $\Delta$  і  $c_1$  значення жорсткості  $c_{p.k.}(c_1, \Delta)$ , що співпадають до перших значущих цифр після коми;

– умови закріплення приймаючої рейки на лівому кінці впливає на його жорсткісні характеристики на лівому кінці, наприклад, для схем закріплення 1,3 і 4,5 при  $c_1 = 1,5 \cdot 10^8$  Н/м і  $\Delta = 30$  мм одержимо зростання  $c_{p.k.}$  відповідно в 2,84 і 2,87 рази;

– установлено, що залежності  $c_{p.k.}(c_1, \Delta)$  при  $c_1 = \text{const}$  і  $\Delta = \text{Var}$  носять монотонно убутний характер, наприклад для схем 1 і 5 зміна зазору  $\Delta$  у діапазоні  $\Delta = [1 \div 60]$  мм при  $c_1 = 1,5 \cdot 10^8$  Н/м призводить до зменшення жорсткості приймаючої рейки на лівому кінці в діапазоні  $c_{p.k.} = [4,5 \div 1,91] \cdot 10^5$  Н/м, тобто її зниженню в 2,36 рази;

– для схем закріплення 3 і 4 залежності  $c_{p.k.}(c_1, \Delta)$  при  $c_1 = \text{const}$  і  $\Delta = \text{var}$  носять стаціонарний характер, наприклад, при  $c_1 = 1,5 \cdot 10^8$  Н/м одержимо  $c_{p.k.} = 0,95 \cdot 10^5$  Н/м = const для всіх значень  $\Delta = [1 \div 60]$  мм;

– для схем закріплення 3 при  $\Delta = 30$  мм і зміні жорсткості  $c_1$  у діапазоні  $c_1 = [0,5 \div 2] \cdot 10^8$  Н/м має місце зростання жорсткості приймаючої рейки на лівому кінці в діапазоні  $c_{p.k.} = [0,32 \div 1,7] \cdot 10^5$  Н/м, тобто в 5,31 рази.

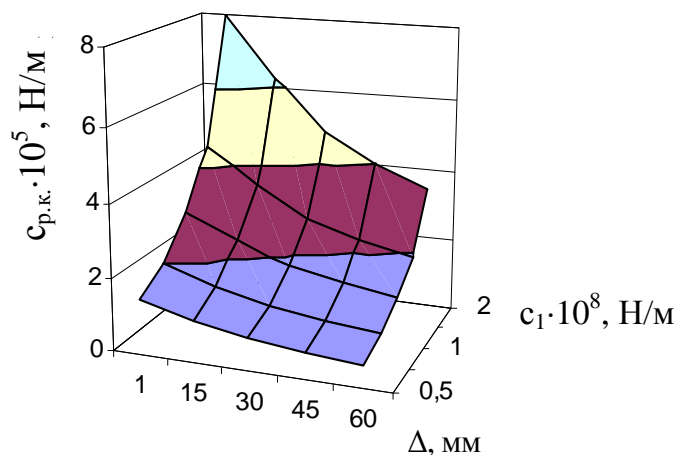


Рис. 4.7. Характеристики жорсткості  $c_{p.k.}(c_1, \Delta)$

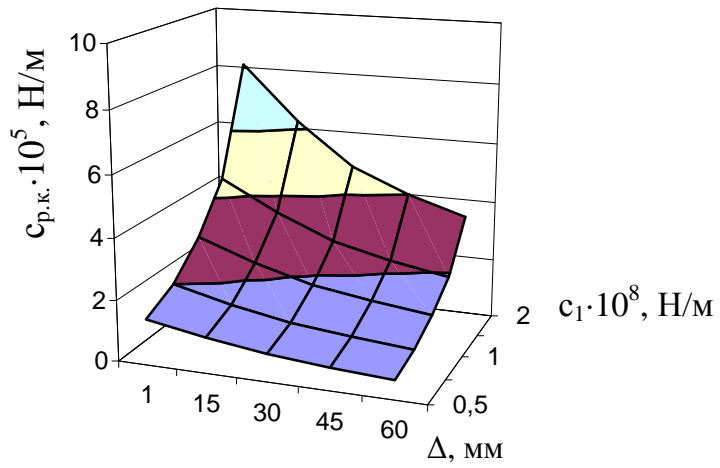


Рис. 4.8. Характеристики жорсткості  $c_{p.k.}$  ( $c_1, \Delta$ )

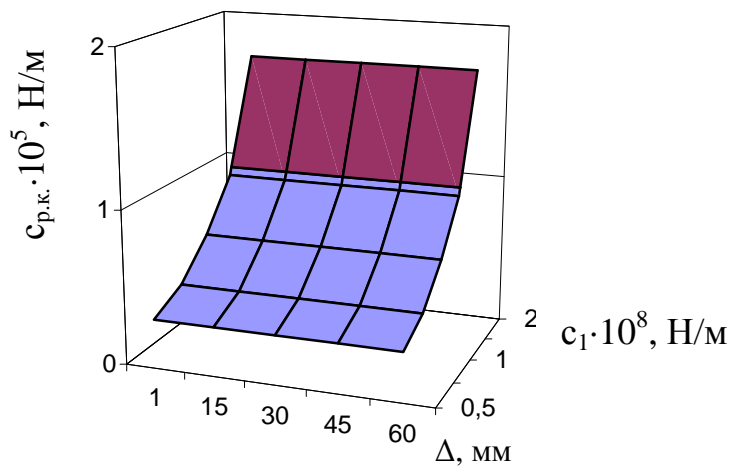


Рис. 4.9. Характеристики жорсткості  $c_{p.k.}$  ( $c_1, \Delta$ )

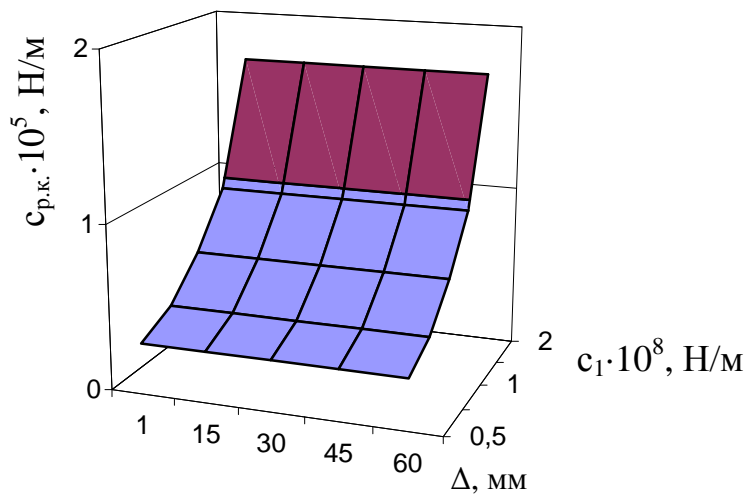


Рис. 4.10. Характеристики жорсткості  $c_{p.k.}$  ( $c_1, \Delta$ )

Отримані в розділі 4.2 характеристики жорсткості приймаючої рейки на кінці використовуються надалі в розділі 4.3 роботи при розрахунку й аналізі параметрів взаємодії вагона з рейковою колією в місці ізольованої стикової нерівності.

### **4.3 Вплив експлуатаційних і конструктивних параметрів вагона і верхньої будови колії на прогини приймаючої рейки в місці стику**

#### **4.3.1 Взаємодія в системі «вагон – рейкова колія» в місці стику «зазор – ступінь вниз»**

Механічна схема стику приведена на рис. 3.1.

Розглянемо виникаючі в процесі взаємодії колеса вагона з рейкою в місці стикового з'єднання «зазор – ступінь вниз» прогини приймаючої рейки під першою шпалою в залежності від різних експлуатаційних факторів (завантаження вагона  $m_2$ , швидкість руху  $V_x$  вагона, жорсткість підвіски  $c$ ), параметрів стику (величина зазору  $\Delta$  і висота ступіні  $h$ ), а також жорсткості  $c_1$  баластового шару.

Дослідження виконаємо на підставі формул (3.12), (3.26), (3.79), (3.84)–(3.87). При цьому умови закріплення приймаючої рейки відповідають схемі 3 табл. 3.1, а його геометричні і механічні параметри відповідають даним розділу 4.2 даної роботи.

Шпали при ударній взаємодії з колесом вагона сприймають силове навантаження від рейок і передають її на баластовий шар. При цьому відповідно до вимог експлуатації [1–3,102] тиск, що передається баластовому шару, не повинен перевищувати гранично припустимого значення, що у літній період дорівнює:  $[\sigma] = 19,62 \text{ Н/см}^2$  [1,102]. У протилежному випадку відбудеться порушення цілісності баластового шару.

Величина припустимого прогину  $[y_1]$  залежить від площі зіткнення шпали і полотнини, ваги шпали, а також жорсткості баластового шару [1–3,102].

Напруження  $\sigma_{пр}$ , що передається баластовому шару при прогинах рейки, визначимо за формулою [1,3,102]:

$$\sigma_{пр} = \frac{P}{F_{шп}} = \frac{y_1 \cdot c_1}{F_{шп}},$$

де  $y_1$  – прогин приймаючої рейки під першою шпалою;

$F_{шп}$  – площа шпали, що приходить на рейку.

З урахуванням ваги шпали  $Q_{шп}$ , що приходить на одну рейку, і рейки  $Q_p$ , що приходить на одну шпалу, одержимо

$$\sigma_v + \sigma_{пр} \leq [\sigma], \quad (4.1)$$

де  $\sigma_v = \frac{Q_{шп} + Q_p}{F_{шп}}$  – напруження, що передається на баластовий шар під шпалою.

Остаточно для величини припустимого прогину одержимо:

$$[y_1] = \frac{[\sigma]F_{шп} - Q_{шп} - Q_p}{c_1}. \quad (4.2)$$

Значення припустимого прогину  $[y_1]$  для залізобетонної шпали КШ–63П приведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Значення припустимого прогину для залізобетонної шпали КШ–63П

|                    |                  |                  |                |                |
|--------------------|------------------|------------------|----------------|----------------|
| $c_1, \text{Н/м}$  | $0,1 \cdot 10^8$ | $0,5 \cdot 10^8$ | $1 \cdot 10^8$ | $2 \cdot 10^8$ |
| $[y_1], \text{мм}$ | 16,72            | 3,68             | 1,84           | 0,92           |

На рис. 4.11–4.13 приведені залежності, що установлюють вплив завантаження вагона  $m_2 = [4250 \div 7627,5]$  кг і його швидкості руху  $V_x = [1 \div 15]$  м/с для жорсткості підвіски  $c = 8 \cdot 10^5$  Н/м = const, величини зазору стику  $\Delta = 22,65$  мм і висоти його ступіні  $h = 6$  мм = const на характеристики прогинів приймаючої рейки під першою шпалою при жорсткості баластового шару  $c_1 = 0,5 \cdot 10^8$  Н/м,  $c_1 = 1 \cdot 10^8$  Н/м,  $c_1 = 2 \cdot 10^8$  Н/м відповідно.

Аналіз графіків показує наступне:

– зміна завантаження вагона в діапазоні  $m_2 = [4250 \div 7627,5]$  кг, наприклад, при швидкості руху  $V_x = 8$  м/с = const приводить до зміни прогину приймаючої рейки під першою шпалою в діапазоні  $y_1 = [1,68 \div 3,7]$  мм, тобто до його збільшення в 2,2 рази;

– установлено, що збільшення швидкості руху вагона в діапазоні  $V_x = [1 \div 15]$  м/с при жорсткості баластового шару  $c_1 = 1 \cdot 10^8$  Н/м = const і максимальному завантаженню вагона  $m_2 = 7627,5$  кг = const приводить до зміни величини прогину в діапазоні  $y_1 = [2,82 \div 4,23]$  мм, тобто його зростанню в 1,5 рази;

– при середньому завантаженні вагона  $m_2 = 5940$  кг = const, швидкості його руху  $V_x = 8$  м/с = const збільшення жорсткості баластового шару в діапазоні  $c_1 = [0,5 \div 2] \cdot 10^8$  Н/м обумовлює зниження величини прогину в діапазоні  $y_1 = [1,89 \div 0,83]$  мм, тобто в 2,28 рази.

На рис. 4.14–4.16 приведені залежності впливу швидкості руху вагона ( $V_x = 5$  м/с;  $V_x = 10$  м/с;  $V_x = 15$  м/с), завантаження вагона  $m_2 = [4250 \div 7627,5]$  кг і висоти ступіні стику  $h = [1 \div 12]$  мм на характеристики прогинів приймаючої рейки під першою шпалою для жорсткості підвіски  $c = 8 \cdot 10^5$  Н/м = const, величини зазору стику  $\Delta = 22,65$  мм = const і жорсткості баластового шару  $c_1 = 1 \cdot 10^8$  Н/м = const.



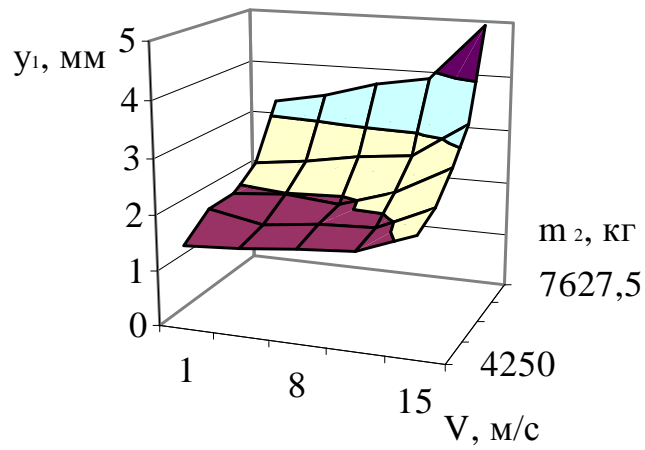


Рис. 4.11. Вплив завантаження вагона на прогини під першою шпалою приймаючої рейки при жорсткості баластового шару  $c_1 = 0,5 \cdot 10^8$  Н/м

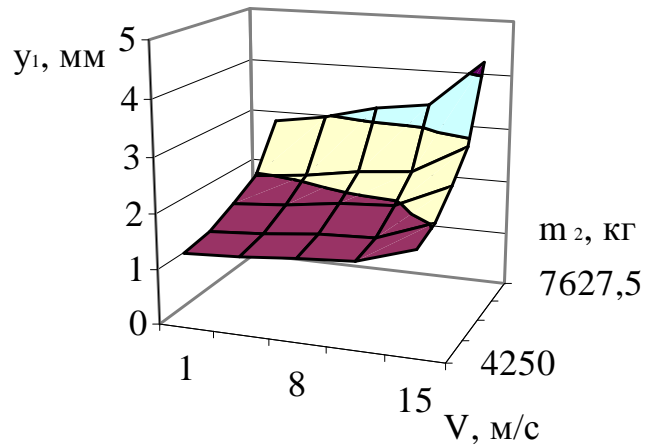


Рис. 4.12. Вплив завантаження вагона на прогини під першою шпалою приймаючої рейки при жорсткості баластового шару  $c_1 = 1 \cdot 10^8$  Н/м

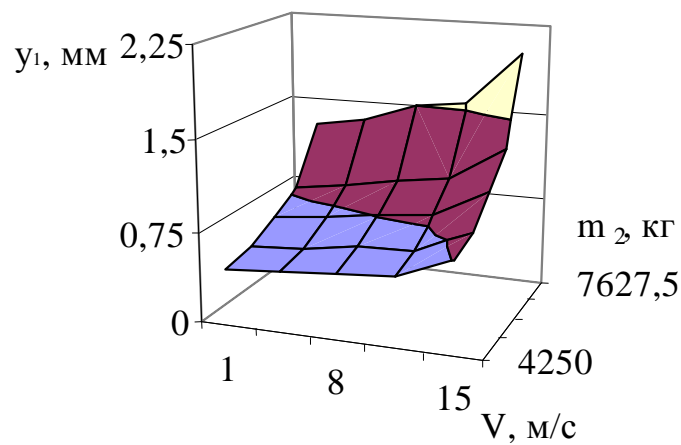


Рис. 4.13. Вплив завантаження вагона на прогини під першою шпалою приймаючої рейки при жорсткості баластового шару  $c_1 = 2 \cdot 10^8$  Н/м

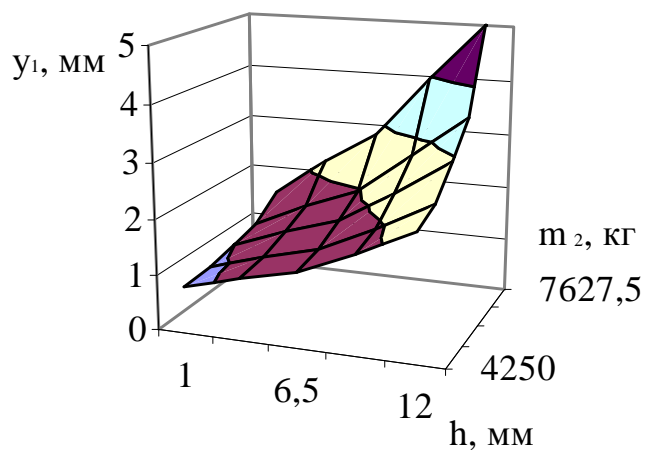


Рис. 4.14. Вплив завантаження вагона на прогини під першою шпалою приймаючої рейки при швидкості  $V_x = 5$  м/с

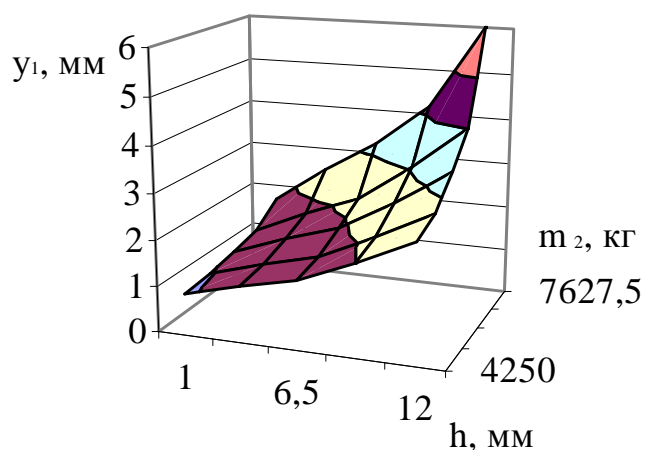


Рис. 4.15. Вплив завантаження вагона на прогини під першою шпалою приймаючої рейки при швидкості  $V_x = 10$  м/с

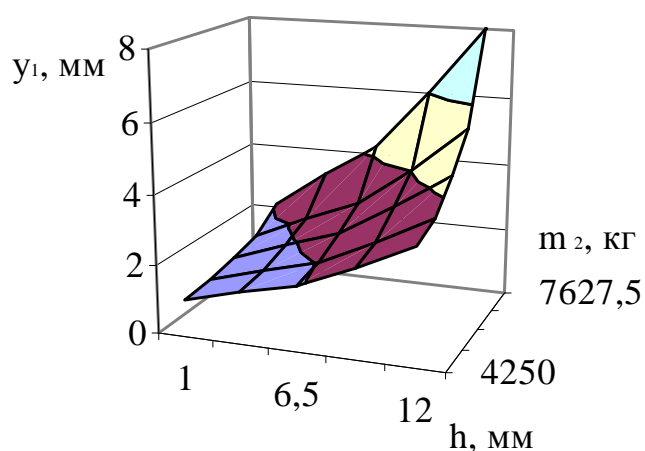


Рис. 4.16. Вплив завантаження вагона на прогини під першою шпалою приймаючої рейки при швидкості  $V_x = 15$  м/с

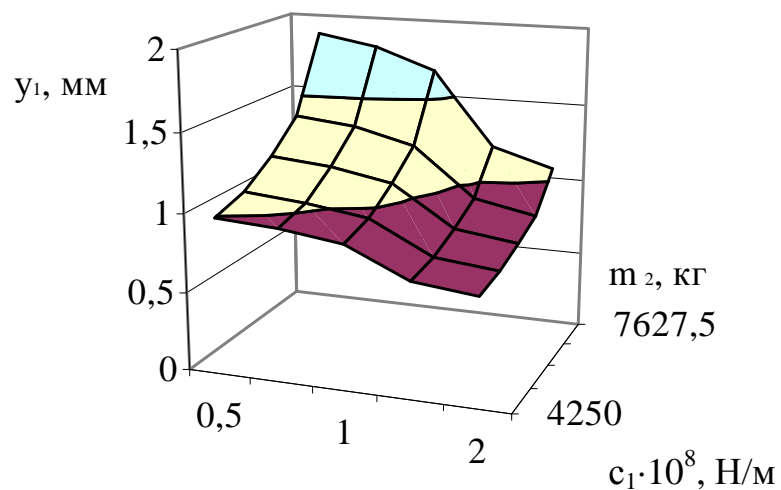


Рис. 4.17. Вплив завантаження вагона на прогини під першою шпалою приймаючої рейки при висоті ступіні  $h = 1$  мм

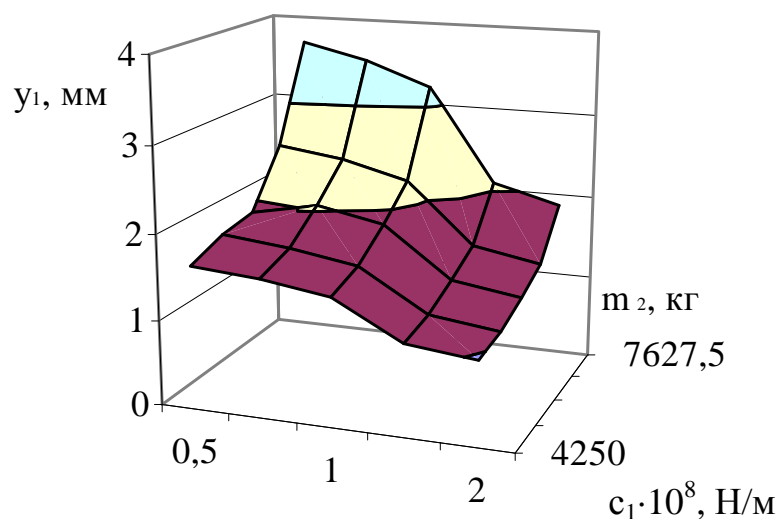


Рис. 4.18. Вплив завантаження вагона на прогини під першою шпалою приймаючої рейки при висоті ступіні  $h = 6,5$  мм

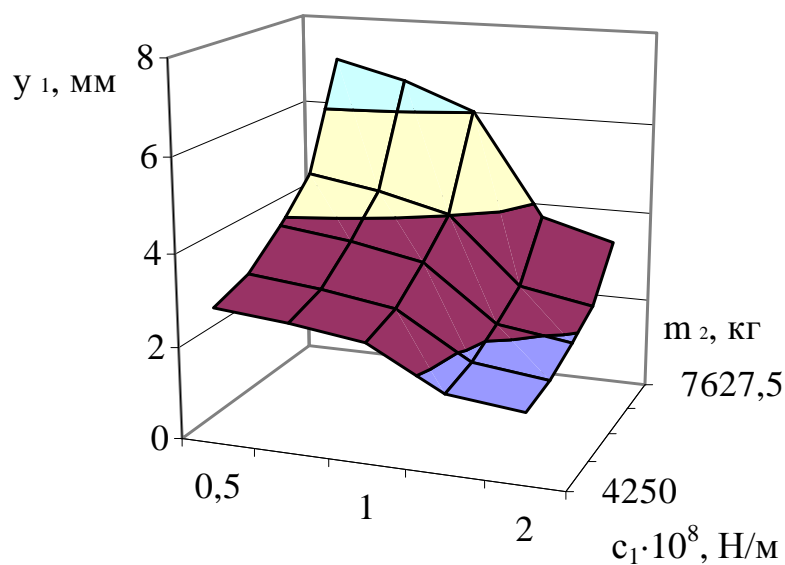


Рис. 4.19. Вплив завантаження вагона на прогини під першою шпалою приймаючої рейки при висоті ступіні  $h = 12$  мм

Аналіз приведених залежностей (рис. 4.14 – 4.16)  $y_1(m_2, h)$  дозволяє зробити наступні висновки:

– характеристика  $y_1 = y_1(m_2, h = 6,5 \text{ мм})$  при зміні завантаження вагона в діапазоні  $m_1 = [4250 \div 7627,5] \text{ кг}$ ,  $c = 8 \cdot 10^5 \text{ Н/м} = \text{const}$  і  $\Delta = 22,65 \text{ мм} = \text{const}$  носить монотонно зростаючий характер у діапазоні  $y_1 = [1,35 \div 2,82] \text{ мм}$ , тобто збільшується в 2,08 рази;

– при збільшенні висоти ступіні в діапазоні  $h = [1 \div 12] \text{ мм}$ ,  $m_2 = 5940 \text{ кг} = \text{const}$  і  $V_x = 10 \text{ м/с} = \text{const}$  має місце зростання прогину в діапазоні  $y_1 = [1,08 \div 3,36] \text{ мм}$ , тобто в 3,1 рази;

– встановлено, що збільшення швидкості руху вагона в діапазоні  $V_x = [5 \div 15] \text{ м/с}$  при  $c = 8 \cdot 10^5 \text{ Н/м} = \text{const}$ ,  $c_1 = 1 \cdot 10^8 \text{ Н/м} = \text{const}$ ,  $\Delta = 22,65 \text{ мм} = \text{const}$ ,  $m_2 = 7627,5 \text{ кг} = \text{const}$  і  $h = 12 \text{ мм} = \text{const}$  викликає зміну величини прогину рейки в діапазоні  $y_1 = [5,25 \div 8,1] \text{ мм}$ , тобто його зростання в 1,54 рази.

На рис. 4.17–4.19 приведені характеристики, що встановлюють вплив завантаження вагона  $m_2 = [4250 \div 7627,5] \text{ кг}$  і жорсткості баластового шару  $c_1 = [0,5 \div 2] \cdot 10^8 \text{ Н/м}$  на прогини для швидкості руху вагона  $V_x = 7,5 \text{ м/с} = \text{const}$ , жорсткості його підвіски  $c = 8 \cdot 10^5 \text{ Н/м} = \text{const}$ , величині зазору  $\Delta = 22,65 \text{ мм} = \text{const}$  і висоті ступіні  $h = [1; 6,5; 12] \text{ мм}$ .

Представлені на рис. 4.17–4.19 залежності  $y_1(m_1, c_1)$  показують наступне:

– при зміні завантаження вагона в діапазоні  $m_2 = [4250 \div 7627,5] \text{ кг}$ ,  $h = 6,5 \text{ мм}$ ,  $c = 8 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$ ,  $c_1 = 1 \cdot 10^8 \text{ Н/м}$ ,  $\Delta = 22,65 \text{ мм}$  прогин  $y_1$  змінюється в діапазоні  $y_1 = [1,5 \div 3,21] \text{ мм}$ , збільшуючись у 2,14 рази;

– при жорсткості підвіски вагона  $c = 8 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$ , його завантаженню  $m_2 = 5940 \text{ кг}$  збільшення висоти стику в діапазоні  $h = [1 \div 12] \text{ мм}$  для  $c_1 = 1 \cdot 10^8 \text{ Н/м}$  і  $\Delta = 22,65 \text{ мм}$  прогин приймаючої рейки під першою шпалою зростає в діапазоні  $y_1 = [1,08 \div 3,36] \text{ мм}$ , тобто в 3,1 рази;

– при максимальному завантаженні вагона  $m_2 = 7627,5 \text{ кг}$ , жорсткості його підвіски  $c = 8 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$ , висоті стику колії  $h = 12 \text{ мм}$ , його зазорі

$\Delta = 22,65$  мм зміна жорсткості баластового шару в діапазоні  $c_1 = [0,5 \div 2] \cdot 10^5$  Н/м призводить до зниження величини прогину в діапазоні  $y_1 = [7,03 \div 3,25]$  мм, тобто в 2,17 рази.

На практиці представлені на рис 4.11–4.19 залежності використовуються при розробці швидкісних режимів руху вагонів з урахуванням його завантаження, жорсткості підвіски вагона, а також реального стану рейкової колії, що визначається жорсткістю баластового шару, місцем розташування, типом і конструктивними характеристиками стикового з'єднання. Наприклад, якщо вагон, що проходить рейковий стик типу «зазор – ступінь вниз», має параметри: жорсткість підвіски  $c = 8 \cdot 10^5$  Н/м; середнє завантаження ( $m_2 = 5938$  кг), а стикове з'єднання рейкової колії (рейка Р–65), виконане у виді симетричних шпальних ґрат з нормальною епюрою (шпала залізобетонна типу КШ–63П), має зазор  $\Delta = 22,65$  мм і висоту ступіні  $h = 6$  мм, то при жорсткості баластового шару  $c_1 = 1 \cdot 10^8$  Н/м його швидкість руху, що забезпечує приналежність параметрів динамічної взаємодії вагона з рейковою колією в місці стикової нерівності, а також осідання колій в місці стику, області припустимих вимогами експлуатації значень, повинна бути рівною, з огляду на дані розділу 4.3.1,  $V_x \leq 4,01$  м/с.

#### **4.3.2 Параметри динамічної взаємодії при стику типу "зазор"**

У даному розділі роботи проведені дослідження впливу швидкості руху вагона, його завантаження на прогини приймаючої рейки під першою шпалою при проходженні вагоном стику типу "зазор" при працюючій (схема закріплення 1) і непрацюючій накладці "ліворуч" (схема 2). Тут враховано (див. розділ 4.2), що наявність або відсутність накладки на правому кінці рейки практично не впливає на прогини приймаючої рейки "ліворуч" (розходження не перевищує 1%).

Рівняння (3.86), (3.87) для розрахунку зазначених параметрів прогину отримані в розділі 3.3 роботи.

При цьому на рис. 4.20 ÷ 4.22 приведені залежності прогинів при впливі швидкості вагона  $V_x = V_{ar} = [5;10;15]$  м/с, завантаження вагона  $m_2 = [4250 ÷ 7627,5]$  кг при жорсткості  $c_1 = [0,5 ÷ 2] \cdot 10^8$  Н/м, а також зазори стику  $\Delta_{cp} = 19,8$  мм і працюючій ліворуч накладці.

У результаті досліджень установлене наступне:

– залежність  $z(m_2, c_1)$  при завантаженні  $m_2 = V_{ar}$  і жорсткості  $c_1 = \text{const}$  носять монотонно зростаючий характер, наприклад, при  $V_x = 5$  м/с,  $c_1 = 1,5 \cdot 10^8$  Н/м і зміні завантаження вагона в діапазоні  $m_2 = [4250 ÷ 7627,5]$  кг прогин під першою шпалою приймаючої рейки змінюється в діапазоні  $z = [0,58 ÷ 0,87]$  мм, тобто зростає в 1,5 рази;

– збільшення завантаження вагона в діапазоні  $m_2 = [4250 ÷ 7627,5]$  кг при швидкості вагона  $V_x = 10$  м/с, жорсткості  $c_1 = 1 \cdot 10^8$  Н/м приводить до збільшення прогину в діапазоні  $z = [0,66 ÷ 1,15]$  мм, тобто в 1,74 рази;

– при середньому завантаженні вагона ( $m_2 = 6262,5$  кг), а також швидкості руху вагона  $V_x = 15$  м/с збільшення жорсткості баластового шару колії в діапазоні  $c_1 = [0,5 ÷ 2] \cdot 10^8$  Н/м обумовлює зменшення величини прогину в діапазоні  $z = [1,19 ÷ 0,67]$  мм, тобто в 1,78 рази.

На рис. 4.23 ÷ 4.25 представлені залежності  $z(m_2, c_1)$  при  $V_x = V_{ar} = [5;10;15]$  м/с для схеми закріплення 2.

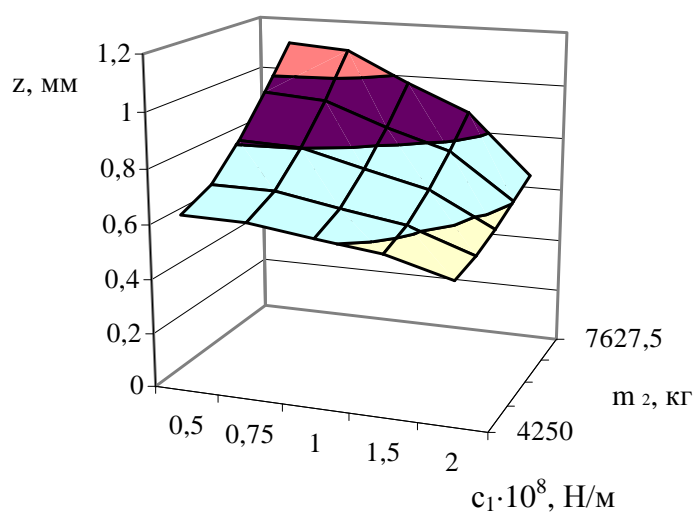


Рис. 4.20. Вплив завантаження вагона на прогини під першою шпалою приймаючої рейки при швидкості  $V_x = 5$  м/с

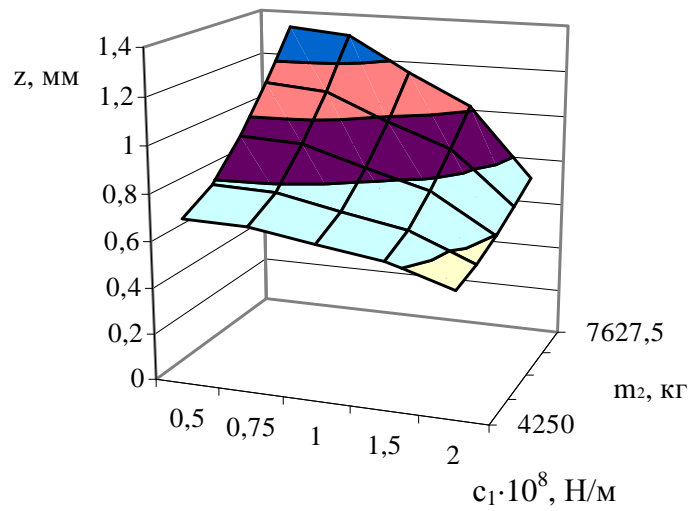


Рис. 4.21. Вплив завантаження вагона на прогини під першою шпалою приймаючої рейки при швидкості  $V_x = 10$  м/с

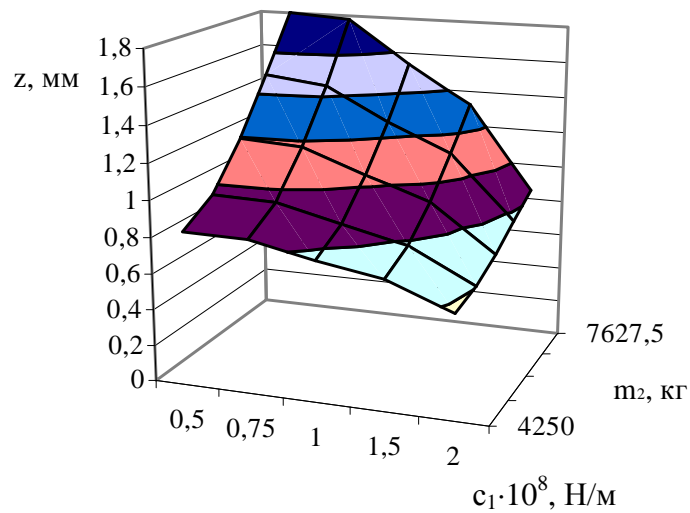


Рис. 4.22. Вплив завантаження вагона на прогини під першою шпалою приймаючої рейки при швидкості  $V_x = 15$  м/с

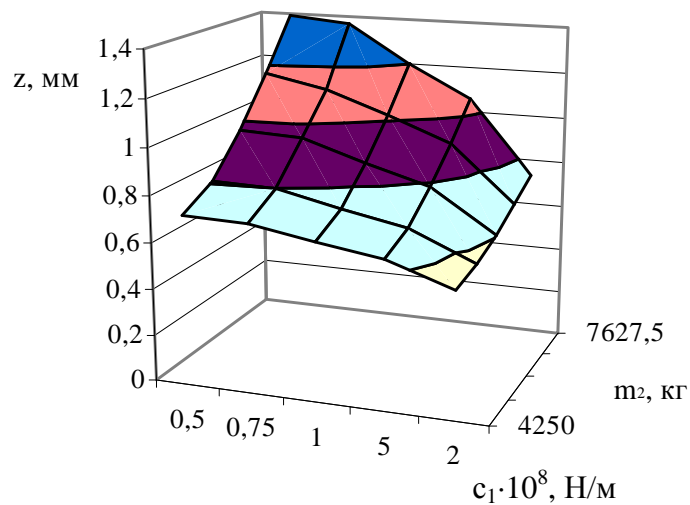


Рис. 4.23. Вплив завантаження вагона на прогини під першою шпалою приймаючої рейки при швидкості  $V_x = 5$  м/с

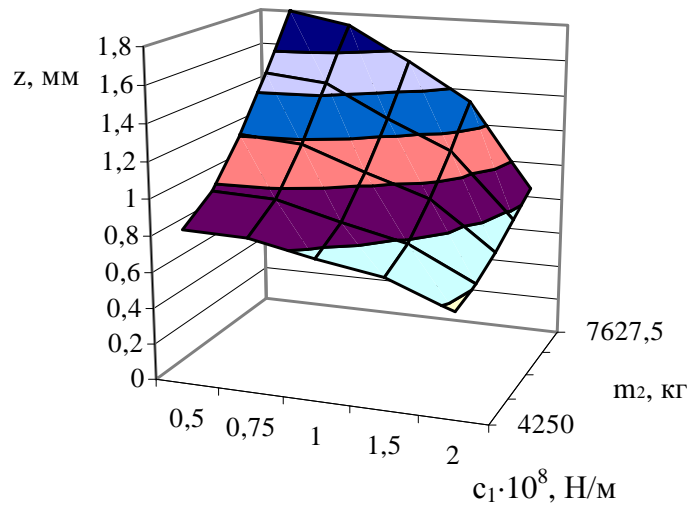


Рис. 4.24. Вплив завантаження вагона на прогини під першою шпалою приймаючої рейки при швидкості  $V_x = 10$  м/с

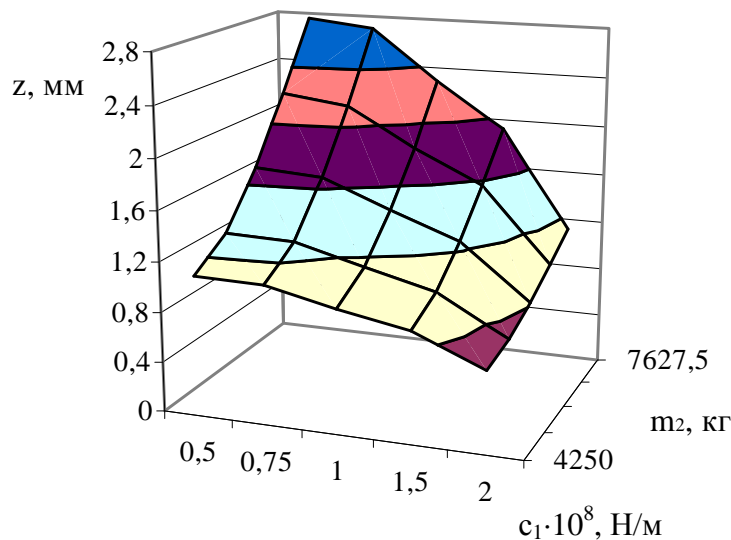


Рис. 4.25. Вплив завантаження вагона на прогини під першою шпалою приймаючої рейки при швидкості  $V_x = 15$  м/с

Їхній аналіз показує:

- при максимальному завантаженні вагона ( $m_2 = 7627,5$  кг) і швидкості руху вагона  $V_x = 5$  м/с умова закріплення приймаючої рейки на лівому кінці впливає на величини її прогинів під першою шпалою: наприклад, для жорсткості баластового шару  $c_1 = 1,5 \cdot 10^8$  Н/м одержимо значення прогинів  $z = 0,86$  мм (схема закріплення 1) і  $z = 1,06$  мм (схема 2);

- збільшення швидкості руху вагона в діапазоні  $V_x = [5 \div 15]$  м/с призводить при завантаженні вагона  $m_2 = 7627,5$  кг і жорсткості баластового шару  $c_1 = 1 \cdot 10^8$  Н/м до зміни (зростання) прогину приймаючої рейки в діапазоні  $z = [1,2 \div 2,3]$  мм, тобто в 1,92 рази;



– збільшення завантаження вагона в діапазоні  $m_2 = [4250 \div 7627,5]$  кг при швидкості вагона  $V_x = 5$  м/с і жорсткості  $c_1 = 1,5 \cdot 10^8$  Н/м обумовлює зміну (зростання) прогину в діапазоні  $z = [0,63 \div 1,06]$  мм, тобто збільшення в 1,7 рази;

– при максимальному завантаженні вагона ( $m_2 = 7627,5$  кг) і швидкості вагона  $V_x = 10$  м/с збільшення жорсткості баластового шару в діапазоні  $c_1 = [0,5 \div 2] \cdot 10^8$  Н/м призводить до зменшення прогинів у діапазоні  $z = [1,83 \div 0,85]$  мм, тобто в 2,15 рази.

Таким чином, представлені на рис. 4.20–4.25 залежності доцільно використовувати на практиці при розробці швидкісних режимів руху вагонів з урахуванням їх завантаження, жорсткості підвіски вагона, а також реального стану рейкової колії, що визначається жорсткістю баластового шару, місцем розташування, типом і конструктивними характеристиками стикового з'єднання. Наприклад, якщо вагон, що проходить рейковий стик типу «зазор» при схемі закріплення 2, має параметри: жорсткість підвіски  $c = 8 \cdot 10^5$  Н/м; максимальне завантаження ( $m_2 = 7627,5$  кг), а стикове з'єднання рейкової колії (рейка Р–65) виконано у виді симетричних шпальних ґрат з нормальною епурою (шпала залізобетонна типу КШ–63П), має зазор  $\Delta = 19,8$  мм, то при жорсткості баластового шару  $c_1 = 1 \cdot 10^8$  Н/м його конструктивна швидкість руху, що забезпечує приналежність параметрів динамічної взаємодії вагона з рейковою колією в місці стикової нерівності, а також осідання колій в місці стику, області припустимих вимогами експлуатації значень, повинна бути по величині, з огляду на дані розділу 4.3.2,  $V_x \leq 12,0$  м/с.

Відповідно до отриманих результатів *Методика* визначення швидкісних режимів руху вагона на ділянках рейкової колії зі стиковими з'єднаннями матиме наступний вигляд.

Етапи і вихідні дані методики.

*Етап 1.* Визначення приведеної маси колеса ( $m_1$ , кг), маси вагона ( $m_2$ , кг) з урахуванням його заданого (середнього, максимального) завантаження пасажирями, радіуса колеса ( $r$ , м).

*Етап 2.* Визначення конструктивних і механічних параметрів рейкової колії і стику: тип стику, його ширина ( $\Delta$ , м) і висота ( $h$ , м); граничні умови закріплення віддаючої і приймаючої рейки; тип шпали, площа ( $F_{\text{шп}}$ ,  $\text{м}^2$ ) її опорної поверхні і вага ( $Q_{\text{шп}}$ , Н), що приходить на одну рейку; тип рейки, її вага ( $Q_r$ , Н), що приходить на стикову шпалу, модуль пружності ( $E$ ,  $\text{Н/м}^2$ ), момент інерції ( $J$ ,  $\text{см}^4$ ); стикова накладка – двохголова, модуль пружності ( $E_n$ ,  $\text{Н/м}^2$ ), момент інерції ( $J_n$ ,  $\text{см}^4$ ), товщина ( $b_n$ , м), висота ( $h_n$ , м).

*Етап 3.* Визначення характеристик жорсткостей ресорного підвішування вагона ( $c$ ,  $\text{Н/м}$ ), баластного шару ( $c_1$ ,  $\text{Н/м}$ ), питомих тисків ( $[\sigma]$ ,  $\text{Н/м}^2$ ) і припустимих прогинів ( $[y_1]$ , м) під першою шпалою приймаючої рейки шляху.

Величини припустимих прогинів визначаються за формулою (4.2).

*Етап 4.* Визначення прогинів приймаючої рейки під першою шпалою.

Величини прогинів ( $y_1$ , мм) під першою шпалою приймаючої рейки за формулою (4.2).

*Етап 5.* Визначення припустимої швидкості ( $[V]$ , м/с) руху вагона на ділянці колій зі стиковими з'єднаннями.

Для цього будується графік (рис. 4.26) залежності ( $y_1(c_1, m_2, V)$ , мм).

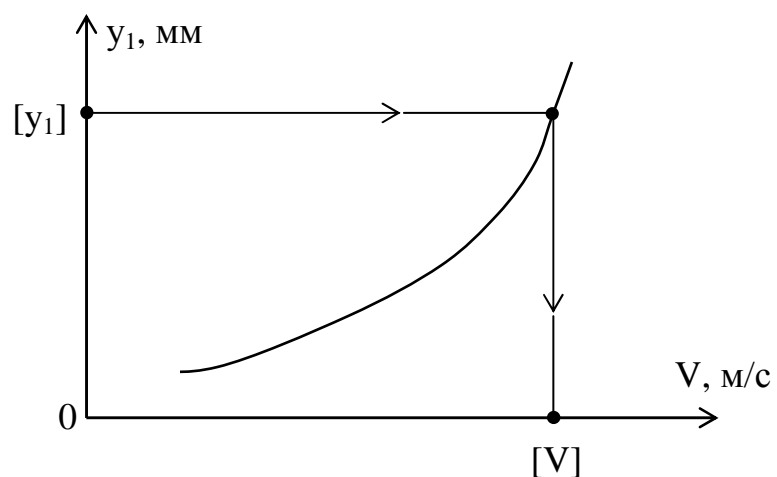


Рис. 4.26. Залежність прогинів приймаючої рейки від швидкості

Величина швидкості  $[V]$  визначається у відповідності до показаних на рис. 4.26 стрілок "ключем" з урахуванням величини припустимого прогину  $[y_1]$  і залежності  $y_1(c_1, m_2, V)$ , що будується для заданих жорсткості  $c_1$  і завантаження вагона  $m_2$ .

*Етап 6.* Визначення раціональної швидкості руху трамвая ( $V_p$ , м/с).

Раціональна швидкість визначається з умови

$$V_p \leq [V].$$

При виконанні даної умови під першою шпалою приймаючої рейки прогини, а також питомі тиски на баластний шар не будуть перевищувати припустимих значень  $[y_1]$  і  $[\sigma]$ .

Приклад розрахунку раціональної швидкості стосовно трамвая Т-3.

Вихідні дані для розрахунку:  $m_1 = 1100$  кг;  $m_2 = 7627,5$  кг;  $r = 0,35$  м; стик – типу "зазор";  $\Delta = 19,8$  мм; шпала – залізобетонна КШ–63П;  $F_{\text{шп}} = 0,337$  м<sup>2</sup>;  $Q_{\text{шп}} = 931,95$  Н; рейка – типу Р-65;  $Q_p = 350,71$  Н;  $L = 12,5$  м;  $l = 0,55$  м;  $E = 2,6 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>;  $J = 3573$  см<sup>4</sup>;  $E_H = 2 \cdot 10^4$  кН/см<sup>2</sup>;  $b_H = 45$  мм;  $h_H = 127$  мм;  $c = 8 \cdot 10^5$  Н/м;  $c_1 = 1 \cdot 10^8$  Н/м;  $[\sigma] = 5,33 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>.

Розраховуємо припустимий прогин

$$[y_1] = \frac{5,33 \cdot 10^5 \cdot 0,337 - 931,35 - 350,71}{1 \cdot 10^8} = 1,78 \text{ мм.}$$

За формулами (3.86), (3.87) розраховуємо величину прогину  $y_1$  приймаючої рейки під першою шпалою (дані заносимо до таблиці 4.2).

Таблиця 4.2

Залежність прогинів рейки від швидкості вагона

| Швидкість вагона $V$ , м/с | 5   | 10   | 15  |
|----------------------------|-----|------|-----|
| Прогин рейки $y_1$ , мм    | 1,2 | 1,54 | 2,3 |

Визначаємо *припустиму швидкість*  $[V]$  руху вагона на ділянці колій зі стиковим з'єднанням. Будуємо, використовуючи дані табл. 4.2, графік (рис. 4.26) залежності  $y_1(V)$ .

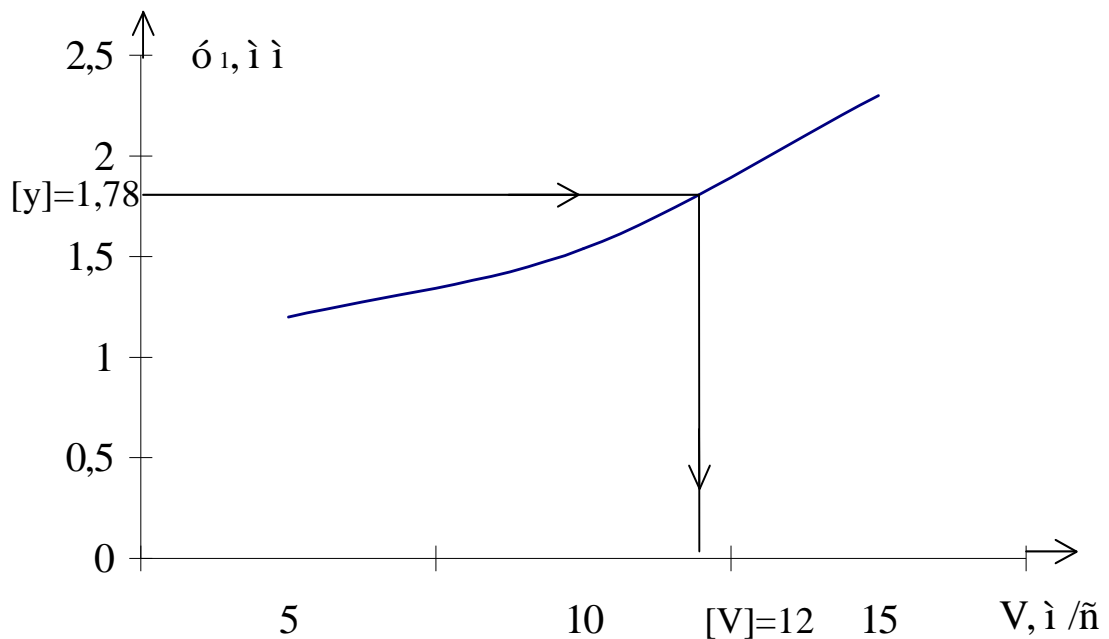


Рис. 4.27. Графік залежності  $y_1(V)$

У відповідності з "ключем" етапу 5 проводимо на рис. 4.27 побудови (показано стрілками), попередньо показавши на осі  $Oy_1$  величину припустимого прогину  $[y] = 1,78$  мм. В результаті отримуємо, що припустима швидкість складає величину

$$[V] = 12 \text{ м/с.}$$

Величину раціональної швидкості руху вагона визначаємо з умови

$$V_p \leq 12 \text{ м/с.}$$

Визначене значення швидкості вагона використовуємо при визначенні його швидкісних режимів руху на ділянці з стиковим з'єднанням заданого типу і заданими геометричними характеристиками.

Методика розповсюджується на трамвайні маршрути, де з'єднання рейок колій виконані збірними та залізничні колії, що мають стикові з'єднання. Її доцільно застосовувати при розробці швидкісних режимів руху трамваїв на маршрутах з урахуванням їх механічної взаємодії з рейко-

вою колією на ділянках з ізольованими стиковими нерівностями. Визначені режими руху трамвая враховують завантаження вагона, тип стикового з'єднання, його місцезнаходження на ділянці шляху, жорсткість баластового шару, граничні умови закріплення віддаючої і приймаючої рейок, а також механічні і конструктивні параметри вагона, рейки, самого стику і стикової накладки. Рух трамвая з визначеною раціональною швидкістю  $V_p$  забезпечує умови приналежності параметрів динамічної взаємодії вагона з рейковою колією в місці стикової нерівності області припустимих прогинів  $[y_1]$ , а також питомих тисків  $[\sigma]$  в баластовому шарі під першою шпалою приймаючої рейки. Використання Методики на практиці забезпечує підвищення експлуатаційної надійності і довговічності транспортного засобу і рейкової колії.