

ВТОРА ЧАСТ

ТЕОРИЯ ЗА ДВИЖЕНИЕТО НА ВЛАКА

7. ПРОЦЕС НА ДВИЖЕНИЕТО НА ВЛАКА ПО РЕЛСОВИЯ ПЪТ

Движението на материалните тела е механичен процес, при който те променят своето първоначално положение в пространството под действието на сили, възникващи между тях и заобикалящата ги среда.

Всяко тяло (или група от отделни, здраво свързани помежду си тела) може да бъде приведено в движение само под действието на външна сила. Вътрешните сили (ако такива изобщо съществуват в тялото) могат да имат отношение към неговото движение само в случай че пораждат (в качеството на свои реакции) външни по отношение на тялото сили.

Затова и колесните транспортни средства със собствено задвижване (към които се отнасят и локомотивите, и самоходните вагони) могат да се движат постъпателно под действието на намиращите се в тях двигатели тогава, когато опират върху релсите.

Локомотивите, самоходните вагони и влаковете се преместват по определен път, като от състояние на покой се ускоряват, движат се с определена или променяща се скорост и накрая спират. След всяко спиране следва възобновяване на движението, като процесът отново протича по описаната схема. В процеса на движението съставът представлява едно цяло в кинематично отношение, тъй като локомотивът и вагоните едновременно се ускоряват и забавят и едновременно достигат определена скорост на движение.

Движението на състава е твърде сложен механичен процес, тъй като между, отделните елементи (въпреки еднаквата им скорост) непрекъснато възникват различни и постоянно променящи се взаимодействия. Те се изразяват в появата на различни по големина и посока сили.

Така например при движението на влака върху релсовия път освен силите, които определят постъпателното преместване, възникват и редица добавъчни сили, между които са: силите на триене и натиск в буферите; натискът, създаван от масата на вагоните и предаван на релсовия път посредством ресорното окачване и буксите на колоосите; ударите, възникващи при преминаването на колоосите над междурелсовите съединения, и т.н.

Въздушната среда, която заобикаля влака, също оказва влияние върху него. Челната повърхност на локомотива се врязва във въздуха и непрекъснато го изтласква напред и встрани. Съществува триене между вагоните и въздуха. Посоката на вятъра, респ. посоката на вентилационната струя в подземните руднични условия, също оказва влияние върху движещия се влак. И тук взаимодействието се изразява в сили, които възникват между влака и заобикалящата ги среда.

Постъпателното движение на влака се обуславя от онези сили (или компоненти на сили), чието направление е успоредно на оста на релсовия път.

Силите, които действуват в равнини, перпендикулярни на оста на релсовия път (каквито са например силите на триене между буферите и силите, възникващи от ударите на колоосите по междурелсовите съединения), както и взаимно уравновесяващите се сили, чието направление съвпада с това на движението (такива са опънните сили, действащи в спряговете, и натисковите сили, действащи в буферите), не влияят пряко върху движението на влака. Затова и големините, и характерът на изменението на тези сили са от значение само за механичното оразмеряване на отделните елементи на влака, но не и за изучаване на постъпателното движение на влака като цяло.

Силите, които непосредствено влияят върху постъпателното движение на влака, могат да бъдат сведени до следните две основни групи:

- 1) активни (движещи) сили;
- 2) реактивни (съпротивителни) сили.

Към първата група се отнасят силите, чиято посока съвпада с избраната посока за движение на влака, а към втората - силите, които са с противоположна посока.

Активните сили са причината за постъпателното движение на състава, докато реактивните сили са пречката за осъществяването на това движение и са причината за връщането на състава в състояние на покой при изчезване на активните сили.

По направлението на движението на влаковия състав действуват както постоянни, така и променливи по характер сили.

С постоянен характер са: теглителната сила на локомотива (която е от категорията на активните сили), както и съпротивленията на движението и спирачната сила (които са от категорията на реактивните сили).

С променлив характер са: компонентата на силата на тежестта на състава по направлението на движението, силата на инерцията и силата, възникваща в резултат на взаимодействието между състава и въздушната среда. Тяхна особеност е, че при едни условия на движение се проявяват като активни, а при други – като реактивни сили. Съвсем условно е прието тези сили да бъдат отнасяни към съпротивленията на движението и в литературата те са известни съответно като: “съпротивление от наклона на пътя”, “динамично съпротивление” и “съпротивление от въздушната среда”. Двойственият характер на тези сили се взема пред вид чрез означаването на техните абсолютни стойности със знаците + или -, преди последните да бъдат алгебрично сумирани със същинските съпротивления на движението. Знакът + се приема тогава, когато посоката на съответната променлива по характер сила е обратна на посоката на движение на влака, т.е. когато силата се проявява като реактивна, а знакът -, когато посоката ѝ съвпада с тази на движението и следователно силата действува като активна.

8. ИЗВЕЖДАНЕ НА ОСНОВНОТО УРАВНЕНИЕ ЗА ДВИЖЕНИЕТО НА ВЛАКА

Уравнението за движението на влака представлява математичен израз на зависимостта между ускорението, което влакът получава при постъпателното си движение, и силите, които обуславят това движение.

Ако разгледаме движението на влака като движение на маса, концентрирана в точка, то в същата тази точка (т.е. в центъра на тежестта на влака) ще бъдат приложени и резултантните на двете основни категории сили. Да означим с F резултантната на активните сили, действувачи по направлението на движението, а с ΣW - тази на реактивните сили, действувачи по същото направление. Тъй като двете резултантни са сили с общо направление, но с различни посоки, състоянието на влака ще се определя от тяхната разлика $Q = F - \Sigma W$. Силата Q очевидно е равнодействаща на всички действувачи на влака сили, които имат отношение към неговото движение.

За извеждането на основното уравнение за движението на влака ще изходим от формулата за кинетичната енергия, като ще съставим две равенства: едно за нарастването на кинетичната енергия на влака при преместването му на безкрайно малко разстояние и второ равенство - за работата, която действувачите на влака сили са извършили, за да осъществят това преместване.

При написването на уравнението за кинетичната енергия трябва да се има пред вид, че някои от елементите на влака (като колооси, зъбни колела, ротори на двигатели и т.н.) извършват не само постъпателно, но и въртливо движение. Съставното движение на тези елементи обуславя повишена инертност на влака като цяло.

И така елементарната работа, която равнодействащата сила Q трябва да извърши, за да придвижи влаковия състав на елементарна дължина от пътя dl , ще бъде

$$dA = Qdl = (F - \Sigma W)dl \quad (II-1)$$

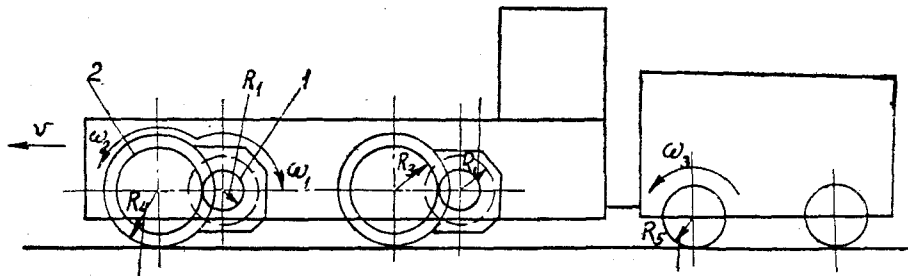
От друга страна, кинетичната енергия, която влакът притежава движейки се със скорост

v , е равна на

$$E = E_1 + E_2 = \frac{Mv^2}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{J_i \cdot \omega_i^2}{2} \quad (\text{II-2})$$

където

- E_1 е кинетичната енергия, запасена в постъпателно движещата се маса на влака;
- E_2 , - кинетичната енергия, запасена във въртящите се елементи на влака;
- M - масата на целия влак;
- J_i - полярният инертен момент на дадена въртяща се част;
- ω_i - ъгловата скорост на съответната въртяща се част;
- n - общият брой на въртящите се части във влаковия състав.



Фиг. II-1

На фиг. II-1 схематично са показани основните въртящи се части на влаковия състав (за опростяване на извода е прието задвижване на колоосите чрез едностепенна зъбна предавка). Като се вземат пред вид нанесените на схемата означения, изразът за кинетичната енергия, запасена във въртящите се части на влака, може да бъде представен по следния начин:

$$E_2 = n_{в.к} \left(\frac{J_1 \cdot \omega_1^2}{2} + \frac{J_2 \cdot \omega_1^2}{2} + \frac{J_3 \omega_2^2}{2} + \frac{J_4 \omega_2^2}{2} \right) + z \cdot n_k \frac{J_5 \omega_3^2}{2},$$

където

- J_1 е полярният инерчен момент, на ротора на тяговия двигател;
- J_2 – полярният инерчен момент на водещото зъбно колело (1);
- J_3 - полярният инерчен момент на водимото зъбно колело (2);
- J_4 - полярният инерчен момент на локомотивната колоос;
- J_5 - полярният инерчен момент на вагонната колоос;
- $n_{в.к}$ - броят на водещите локомотивни колооси;
- n_k - броят на колоосите в един вагон;
- z – броят на вагоните в състава;
- ω_1 - ъгловата скорост на вала на двигателя;
- ω_2 - ъгловата скорост на локомотивната колоос;
- ω_3 - ъгловата скорост на вагонната колоос.

Тъй като всички елементи на влаковия състав се движат с една и съща постъпателна скорост v , то при нормално търкаляне на колоосите по релсите тази скорост ще бъде равна на периферната скорост на точките, разположени по окръжността на търкалянето на колелата. Тогава ъгловите скорости на тези колела, както и ъгловите скорости на свързаните с тях други въртящи се части могат да бъдат изразени чрез постъпателната скорост на движението v по следния начин:

$$\omega_3 = \frac{v}{R_5} \quad (\text{II-3})$$

$$\omega_2 = \frac{v}{R_4}, \quad (\text{II-4})$$

$$\omega_1 = \mu \omega_2 = \mu \frac{v}{R_4}, \quad (\text{II-5})$$

където μ е предавателното число на силовата предавка, а R_5 и R_6 са радиусите съответно на окръжността на търкалянето на вагонното и на локомотивното ходово колело.

След заместването на форм. II-3, II-4 и II-5 в израза за кинетичната енергия, запасена във въртящите се части на влака, същият ще добие вида

$$E_2 = \frac{v^2}{2} \left[n_{в.к} \frac{\mu^2 (J_1 + J_2) + J_3 + J_4}{R_4^2} + z n_k \frac{J_5}{R_5^2} \right]. \quad (\text{II-6})$$

От форм. II-2 и II-6 следва, че уточненият израз за кинетичната енергия на влака ще бъде

$$E = \frac{v^2}{2} \left[M + n_{в.к} \frac{\mu^2 (J_1 + J_2) + J_3 + J_4}{R_4^2} + z n_k \frac{J_5}{R_5^2} \right]. \quad (\text{II-7})$$

Вторият и третият член на затворената в средни скоби сума от горния израз имат измерение на маса, защото по дефиниция

$$J = m \rho^2, \quad (\text{II-8})$$

където

m е масата на въртящата се част;

ρ - инерционният радиус на масата, m

J - полярният инерционен момент на въртящата се част.

Това ни дава основание да изразим споменатите по-горе два члена чрез масата на целия влак:

$$n_{в.к} \frac{\mu^2 (J_1 + J_2) + J_3 + J_4}{R_4^2} + z n_k \frac{J_5}{R_5^2} = \gamma M. \quad (\text{II-9})$$

В резултат форм. II-7 ще се преобразува по следния начин:

$$E_2 = \frac{v^2}{2} M(1 + \gamma) = \frac{v^2}{2} M_{\text{пр}}, \quad (\text{II-10})$$

където $M_{\text{пр}} = M(1 + \gamma)$ е „приведената маса“ на състава, а γ - „инерционният коефициент на въртящите се маси“, който показва каква част от общото усилие, необходимо за ускоряването на влака; се изразходва за създаване на ъглово ускорение на тези маси.

Съпоставянето на форм. II-10 с израза за кинетичната енергия E_1 (форм. II-2) показва, че ако физичната маса M на влака бъде увеличена с γM , то кинетичната енергия, която ще се натрупва в тази увеличена маса при чисто постъпателно движение, ще е еквивалентна на кинетичната енергия, която се запасява във влака при реалното му движение.

За да определим нарастването на кинетичната енергия при увеличаване скоростта на движението на влака, ще диференцираме равенство II-10:

$$\frac{dE}{dv} = M_{\text{пр}} v,$$

откъдето

$$dE = M_{\text{пр}} v dv . \quad (\text{II-11})$$

От теоретичната механика е известно, че нарастването на кинетичната енергия е равно на елементарната работа, извършвана от действащите на материалната точка сили. Можем следователно да приравним получените изрази за dA (форм. II-1) и за dE (форм. II-11), в резултат на което ще получим

$$(F - \Sigma W) dl = M_{\text{пр}} v dv . \quad (\text{II-12})$$

Ако разделим двете страни на горното равенство на величината dl то ще добие вида

$$F - \Sigma W = M_{\text{пр}} v \frac{dv}{dl} , \quad (\text{II-13})$$

понеже $v = \frac{dl}{dt}$, то форм. II-13 може да бъде представена в следния вид:

$$F - \Sigma W = M_{\text{пр}} \frac{dv}{dt} . \quad (\text{II-14})$$

Горният израз в същност е основното уравнение за движението на влака.

9. Теглителна сила

Движението на локомотива е резултат от взаимодействието между въртящите се водещи колооси и неподвижните релси. За по-голяма простота и прегледност ще проследим характера и особеностите на това взаимодействие при една отделна водеща колоос.

На фиг. II-2 са означени силите и въртящите моменти, действащи на колооста. Кинематичната връзка между двигателя и колооста поради същите съображения за простота и прегледност е означена като едностепенна зъбна предавка, състояща се от водещо зъбно колело 1 и водимо зъбно колело 2. При включването на тяговия двигател той развива въртящ момент M_1 , който чрез зъбната предавка се редуцира в момент M_2 , действащ на колооста. Включването на двигателя обаче и появата на въртящите моменти M_1 и M_2 не са достатъчно условие, за да се придвижи колооста по релсата, защото моментът M_2 е породен от въртящия по отношение на колооста двигателен момент M_1 , респ. от вътрешната сила на зацепването на предавката $T = \frac{2M_1}{D_1}$. Известно е, че

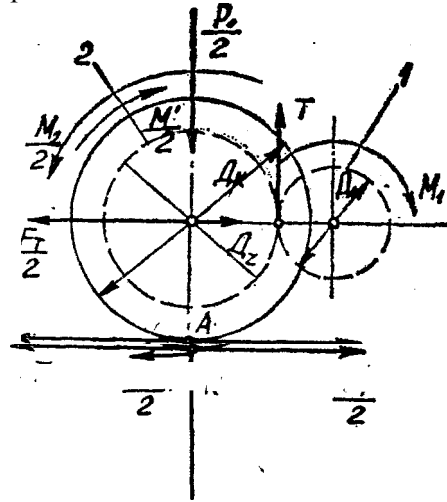
движението на едно тяло е възможно само когато към него бъде приложена достатъчно голяма външна сила. Понеже колооста има съприкосновение с неподатлива среда само в допирните точки на бандажите с релсите, очевидно е, че външните по отношение на локомотива сили могат да бъдат приложени именно в тези точки. Приложеният към колооста двигателен момент M_2 може да се разгледа като ефект от действието на двойка сили с големина F_T , при което едната сила е приложена в допирната точка на едното от ходовите колела на колооста с релсата (т. А), а другата - в центъра на същото колело. Силата F_T (т.е. теглителната сила на двигателя, приведена към периферията на ходовото колело) се определя от. Равенството

$$F_T = \frac{2M_2}{D_K} = \frac{2\mu M_1}{D_K} , \quad (\text{II-15})$$

където $\mu = \frac{D_2}{D_1}$ е предавателното число на зъбната предавка.

Съпротивителният момент M' се обуславя от различните по вид и приложна точка съпротивителни сили, които се проявяват при движението на локомотивната колоос.

Силата W_T е в същност приведената към бандажа на ходовото колело резултантна на


$$W_T = \frac{2M'}{D_K}. \quad (\text{II-16})$$

всяка, от които съответно обуславя въртящ момент $\frac{M_2}{2}$ и $\frac{M'}{2}$.

от силите в съответствие с форм. II-5 и II-16 ще бъде: $\frac{F_T}{2}$ - за теглителната и $\frac{W_T}{2}$ - за съпротивителната.

(P_0 е осовото натоварване на локомотива) и следователно не влияе върху движението на колелото. Фактори в това отношение остават силите $\frac{W_T}{2}$, $\frac{F_T}{2}$ и силата на сцеплението Z .

15

$$Z = \frac{P_0}{2} f, \quad (\text{II-17})$$

където f е коефициентът на триене между бандажа и релсата.

Посоката на силата W_T (респ. на силата $\frac{W_T}{2}$) се определя от посоката на съпротивителния момент M' и обективно съвпада с тази на силата на сцеплението Z .

От изложеното дотук следва, че при тягов режим на задвижването на колооста теглителната сила $\frac{F_T}{2}$, приложена върху бандажа на всяко от колелата, има общо

направление и обратна посока със силите $\frac{W_T}{2}$ и Z . (фиг. II-2).

Условие за нормалното търкаляне на колелото по релсата е допирната точка между, тези два елемента (т. А) да служи на моментен център на завъртане на цялото колело. Понеже т.А може да се разглежда и като точка от периферията на въртящия се бандаж, изискването тя да остава неподвижна при допирание с релсата може да се формулира и като изискване за взаимно уравнивяване на приложените в нея сили, т.е

$$\frac{F_T}{2} = Z + \frac{W_T}{2} \quad (\text{II-18})$$

или

$$\frac{F_T - W_T}{2} = Z. \quad (\text{II-19})$$

Горният израз дава връзката между моментните стойности на сили, за които е характерно следното:

а. Моментната стойност на тангенциалната теглителна сила F_T може да бъде променяна в твърде широки граници чрез регулиране на въртящия момент на двигателя или чрез регулиране на предавателното число на силовата предавка (вж. форм. II-15).

б. Моментната стойност на тангенциалното съпротивление W_T , се изменя неуправляемо в зависимост от условията на движението.

в. Моментната стойност на силата на сцеплението Z следва измененията на остатъчната тангенциална теглителна сила $\frac{F_T - W_T}{2}$, на която (съгласно закона за действието и противодействието) се явява реакция. Максималната стойност, която тя може да достигне при това, се определя в съответствие с форм. II-17.

От изложеното дотук следва, че за да се осигури нормалното търкаляне на водещото ходово колело по релсата, необходимо е да бъде спазено условието

$$Z \leq Z_{\max} \quad (\text{II-20})$$

В съответствие с форм. II-19 и II-17 горният израз може да бъде преобразуван по следния начин:

$$\frac{F_T - W_T}{2} \leq \frac{P_0}{2} f, \quad (\text{II-21})$$

като f в случая ще бъде коефициентът на триене при покой.

При нарушаването на неравенството (II-21), т.е. при създаването на прекалено голяма периферна теглителна сила чрез форсирането на двигателя, равновесието в т.А (вж. фиг. II-2) се нарушава. Тогава вместо по циклоида последната започва да се движи по окръжност - колелото буксува, при което развиваната теглителна сила значително намалява.

При спазването на неравенство (II-21) силата на сцеплението Z успява да се изравни по

големина с остатъчната тангенциална теглителна сила $\frac{F_T - W_T}{2}$ и следователно двете сили

взаимно се компенсират. В резултат на това върху колелото (респ. върху колооста) остава да действа втората (приложената в неговия център) остатъчна теглителна сила (фиг. II-2). Чрез буксите на колооста действието ѝ се пренася върху локомотивната рама.

От форм. (II -21) може да се извлече и неравенството, осигуряващо нормалното търкаляне по релсовия път на водещата колоос като цяло:

$$F_T - W_T \leq P_0 f . \quad \text{II -22}$$

Горният израз обаче е валиден само за случаите, когато двете ходови колела на колооста контактуват с релсите по окръжности със строго еднакви диаметри. Нарушаването на това условие (вследствие страничното изместване на колооста по отношение на релсовия път) ще предизвика частично приплъзване на едното от ходовите колела спрямо релсата. Отчитането при това на големината на силата на сцеплението чрез коефициента f (който във форм. II-21 съответствува на триене при покой) ще бъде неточно. Ето защо във форм. II-22 коефициентът f следва да се замени с друг с по-ниска стойност коефициент на триене, който държи сметка за частичните приплъзвания на ходовите колела, когато те са обединени в една колоос. Този нов коефициент се нарича „коефициент на сцепление” между ходовите колела и релсите и се бележи обикновено с буквата ψ . В съответствие с направените уговорки и уточнения неравенството, осигуряващо нормалното търкаляне на водещата колоос при тягов режим (форм. II-22), добива вида

$$F_T - W_T \leq P_0 \psi . \quad \text{(II-23)}$$

Локомотивната рама сумира остатъчните тангенциални теглителни сили на водещите колооси (които като правило са еднакви), така че общата теглителна сила, която действа върху нея и която чрез спръга на локомотива може да се предава на вагонния състав, ще бъде

$$F_c = n_{в.к} (F_T - W_T) , \quad \text{(II-24)}$$

където $n_{в.к}$ е броят на водещите локомотивни колооси.

Ако умножим с величината $n_{в.к}$ двете страни на неравенството II-23 и вземем пред вид формула II-24, ще получим

$$F_c \leq n_{в.к} P_0 \psi . \quad \text{(II-25)}$$

От дефиницията за осово натоварване и сцепно тегло на локомотива (форм. I-1 и I-3) следва, че форм. II-25, която изразява условието за нормално (без буксуване) движение на локомотива в тягов режим, ще добие окончателния си вид:

$$F_c \leq P_{сц} \psi , \quad \text{(II-26)}$$

където $P_{сц}$ е сцепното тегло на локомотива.

От форм. II-26 следва, че максималната теглителна сила, която локомотивът може да развие на своя спръг, преди да пробуксуват водещите колооси, е

$$F_{с\max} = P_{сц} \psi . \quad \text{(II-27)}$$

Тази сила е известна като “максимално допустима теглителна сила на локомотива по условието за запазване на сцеплението между водещите колела и релсите”. Тази сила определя тяговите възможности на локомотива и затова тя трябва да бъде толкова голяма, че да осигурява пълното използване на неговата мощност.

От форм. II-27 следва, че увеличаването на стойността на $F_{с\max}$ може да бъде постигнато по два начина: 1) чрез увеличаване сцепното тегло на локомотива; 2) чрез увеличаване на сцеплението между колелата и релсите (т.е. чрез увеличаване стойността на коефициента ψ).

От форм. I-1 следва, че увеличението на сцепното тегло на локомотива е свързано както с увеличаване на неговото служебно тегло, така и с увеличаване броя на водещите

колооси. Първото се осъществява чрез поставянето на допълнителни тежести „баласт" в конструкцията на локомотива, а второто - чрез свеждане до минимум на свободните локомотивни колооси. При рудничните локомотиви възможностите за допълнителна „баластировка" на конструкцията са ограничени и затова като правило всички локомотивни колооси са водещи.

Увеличаването на сцеплението между бандажите на водещите колела и релсите се осъществява чрез почистване на релсите, посипване със сух и чист от примеси кварцов пясък, използване на електромагнитни сили. Периодичното почистване на релсите в руднични условия е необходимост, тъй като те обикновено са покрити с прахен или кален слой, който значително намалява сцеплението между колелото и релсата. Подсипването на кварцов пясък пред водещите локомотивни колела е най-ефикасният и най-разпространеният начин за подобряване на сцеплението. За целта всички локомотиви са снабдени с устройства за подсипване на пясък, които се задействуват по команда от машиниста. Увеличаването на сцеплението между водещите колела и релсите чрез електромагнитни сили предполага използването на специални, намагнитващи се колооси с вградени в ходовите колела бобини. Създаването от тях магнитно поле се затваря през допирните точки на колелата с релсите.

В табл.1 се привеждат опитно получени (въз основа на изследванията на съветския проф. С.А.Волотковский) данни за стойностите на коефициента на сцеплението в подземни руднични условия.

Таблица 1

Режим	Вид на подземния рудник	
	въглищен	руден
Потегляне с подсипване на пясък	$\psi = 0,24$	$\psi = 0,25$
Движение с подсипване на пясък	$\psi = 0,17$	$\psi = 0,20$
Движение без подсипване на пясък	$\psi = 0,12$	$\psi = 0,15$

В табл.2 се привеждат опитно получени данни за коефициента на сцеплението между колелата и релсите в условията на откритите рудници.

Таблица 2

Режим	Състояние на релсите	ψ
Потегляне с подсипване на пясък върху постоянен релсов път	сухи	0,3006
Потегляне с подсипване на пясък върху преносим (временен) релсов път	сухи	0,3087
Потегляне без подсипване на пясък върху постоянни и преносими релсови пътища	сухи	0,2402
Движение с подсипване на пясък върху постоянни и преносими релсови пътища	сухи	0,2217
Движение без подсипване на пясък върху постоянни и преносими релсови пътища	влажни	0,2010
Движение без подсипване на пясък върху постоянни и преносими релсови пътища	замърсени	0,1580
Движение без подсипване на пясък върху постоянни и преносими релсови пътища	заледени	0,1000

10. СЪЩНОСТ И КЛАСИФИКАЦИЯ НА СИЛИТЕ НА СЪПРОТИВЛЕНИЕТО ПРИ ДВИЖЕНИЕ НА ВЛАКОВЕТЕ

Съпротивлението на движението на транспортните средства представлява сума от отделни съпротивления, които възникват при различните режими на движение и се проявяват като резултантна сила, която се противопоставя на движението. Теглителната сила на двигателя трябва да бъде най-малко равна или по-голяма от сумата на отделните сили, които съставят съпротивлението, за да може транспортното средство да премине от положение на покой в положение на движение.

Големината на силите на съпротивлението се изменя в зависимост от много фактори: профила и състоянието на пътя, радиуса на кривите, скоростта на движението, средата, в която се извършва движението, и пр.

Отделните елементи на силата на съпротивлението възникват и действуват в различни точки на състава, обаче при изучаването им те ще бъдат разгледани като сили, приведени, към кръга на търкалянето на колоосите в точките на тяхното допиране с релсите (т.е. приведените в точката, в която действува теглителната сила на колооста). По този начин ще се облекчи сравняването им с активната сила на локомотива, както и изясняването на влиянието им върху режима на движението.

Силите на съпротивление, проявяващи се при движение на влака по прав хоризонтален участък (при отсъствие на вятър), образуват “основното съпротивление на движението” (W_0), което неизменно съществува при всички работни режими на влака.

Силите на съпротивление, които възникват и действуват само при определени условия, образуват “допълнителното съпротивление на движението” ($W_{\text{доп}}$).

Алгебричната сума на съставлящите на основното съпротивление на движението и тази на съставлящите на допълнителното съпротивление на движението, взети заедно, дават “пълното съпротивление на движението” (W):

$$W = W_0 + W_{\text{доп}} = W_0 + W_i = W_{\text{кр}} + W_j + W_{\text{п}}, \quad (\text{II-28})$$

където W_i е допълнителното съпротивление от наклона на пътя;

$W_{\text{кр}}$ - допълнителното съпротивление от кривите на пътя;

W_j - допълнителното съпротивление от ускорението на влака;

$W_{\text{п}}$ - допълнителното съпротивление от потеглянето на влака.

Пълното съпротивление на влака и неговите съставлящи се измерва в нютони.

Тъй като влакът е съставен от локомотив или самоходен вагон и прикачен товар - вагоните, пълното съпротивление на движението може да бъде изразено и по следния начин:

$$W = W' + W'' \quad (\text{II-29})$$

където W' е общото съпротивление на движението на подвижния (теглителния) състав;

W'' - общото съпротивление на движението на прикачените вагони.

Установено е, че най-характерните и най-важните съставлящи на съпротивлението са в пряка зависимост от теглото на локомотивите и вагоните. Ето защо за удобство при изчисленията, е прието общото съпротивление на движението и неговите съставлящи да се изразяват чрез теглото на състава. За целта се въвеждат т.нар. “относителни съпротивления”, изразяващи отношението между съответната сила на съпротивление (измерена в нютони) и теглото на състава (изразено също в нютони).

Ако приемем, че P е теглото на подвижния състав, а Q - теглото на прикачените към него вагони, то общото съпротивление на влака (форм. II-29), изразено чрез относителните съпротивления, ще има вида

$$(P + Q) w = P w' + Q w'' \quad (\text{II-30})$$

където

$w = \frac{W}{(P + Q)}$ е пълното относително съпротивление на влака;

$w' = \frac{W'}{P}$ - пълното относително съпротивление на теглителния състав;

$w'' = \frac{W''}{Q}$ - пълното относително съпротивление на прикачените вагони.

От (форм. II-30) следва, че

$$w = \frac{Pw' + Qw''}{P + Q}. \quad (\text{II-31})$$

От своя страна относителните съпротивления w' и w'' могат да бъдат уточнени (в съответствие с форм. II-28), както следва:

$$w' = \frac{W'}{P} = \frac{W'_0 + W'_i + W'_{\text{кр}} + W'_j + W'_\Pi}{P}$$

или

$$w = w'_0 + w'_i + w'_{\text{кр}} + w'_\Pi \quad (\text{II-32})$$

и

$$w'' = \frac{W''}{Q} = \frac{W''_0 + W''_i + W''_{\text{кр}} + W''_j + W''_\Pi}{Q}$$

или

$$w'' = w''_0 + w''_i + w''_{\text{кр}} + w''_j + w''_\Pi \quad (\text{II-33})$$

тук w'_0 , w'_i , $w'_{\text{кр}}$, w'_j и w'_Π са съответно: относителното основно съпротивление, относителното съпротивление от наклона, относителното съпротивление от кривите, относителното съпротивление от ускоряване и относителното съпротивление от потегляне на теглителния състав, а w''_0 , w''_i , $w''_{\text{кр}}$, w''_j и w''_Π са аналогичните относителни съпротивления на прикачените вагони. От форм. II-32 и II-33 следва, че окончателният вид на форм. II-31 ще бъде

$$w = \frac{P \left(w'_0 + w'_i + w'_{\text{кр}} + w'_j + w'_\Pi \right) + Q \left(w''_0 + w''_i + w''_{\text{кр}} + w''_j + w''_\Pi \right)}{P + Q} \quad (\text{II-34})$$

11. ОСНОВНО СЪПРОТИВЛЕНИЕ НА ДВИЖЕНИЕТО

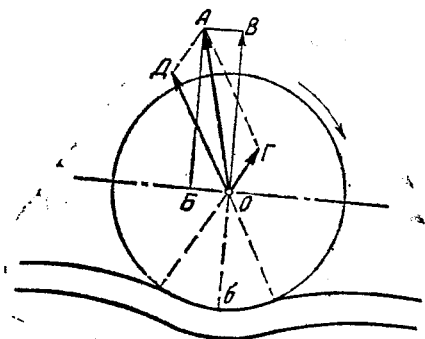
Основното съпротивление на движението е резултантна на следните отделни съпротивления:

1. *Съпротивление на подвижния състав.* То зависи от типа, конструктивните особености и състоянието на подвижния състав и включва:

а. *Съпротивление на търкаляне на колелата,* което зависи: от натиска на колелата върху опорната повърхност; от площта на допирането между колелата и опорната повърхност и от диаметъра на колелата. На фиг. II-3 е показано колело, което се търкаля върху релса. Силата на реакцията ОД, възникваща в точката от релсата, където колелото настъпва, е по-малка от реакцията ОГ, възникваща в точката, където колелото постепенно

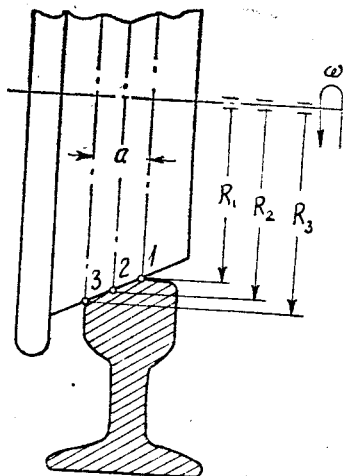
освобождава релсата. В резултат равнодействащата на двете реакции (силата OA), се отклонява от вертикалната ос на колелото и дава компонента по направление на движението (това е силата OB) с посока, обратна на тази на движението. Тази компонента в същност е и съпротивлението на търкалянето.

б. Съпротивление на плъзгане. Дължи се главно на напълно нормалното и неизбежно при експлоатационни условия микробуксуване на колелата, когато към тях е приложена теглителна сила; на приплъзването на колелата в процеса на спиране, както и на приплъзването или даже буксуването на колоос вследствие на нееднаквостта на диаметрите в кръга на търкалянето на колелата й. Изобщо, когато чистото търкаляне на колелата по една или друга причина е нарушено и възниква приплъзване, то силата на триенето, появяваща се при това приплъзване, е именно съпротивлението на плъзгането. Към това съпротивление спада още и триенето на ребордите на бандажите в страните на релсите.



Фиг. II-3

Фиг.3



Фиг. II-4
Фиг.4

в. Съпротивление, обуславяно от коничността на бандажите. Възникването на това съпротивление се дължи на контактуването на бандажа с релсата, което вместо в точка се извършва в плоскост с определена ширина a (вж. фиг. II-4). Скоростта на постъпателното движение на колооста (v) ще наложи ъглова скорост на въртене $w = \frac{v}{R_2}$,

където за разглеждания случай R_2 е радиусът на кръга на търкалянето, минаващ през средата на отсечката 1—3 (вж. фиг. II-4). Периферните скорости на окръжностите на търкаляне, минаващи през т.1 и 3 (т.е. в краищата на контактната площ и притежаващи съответно радиуси R_1 и R_3), очевидно ще се различават от периферната скорост на т.2 (т.е. от постъпателната скорост на движението), тъй като $R_1 > R_2 > R_3$. С други думи, периферната скорост на т.3 ще е по-голяма от тази на т.2 с величината $\Delta v' = v_3 - v_2 = \omega(R_3 - R_2)$, докато скоростта на т.1 ще е по-малка от тази на т.2 с величината $\Delta v'' = \omega(R_2 - R_1)$. При това положение чисто търкаляне ще съществува само по окръжността на търкаляне, преминаваща през т.2, докато по останалата допирна плоскост (т.е. в участъците 2 — 3 и 2—1) ще възникне плъзгане. При това на страната на увеличаващия се радиус (т.е. към реборда на колелото) ще възникнат сили, насочени противоположно на посоката на движението, а към страната на т.7 ще възникнат сили, насочени по посока на движението. Резултантната на тези две групи сили обикновено е насочена обратно на посоката на движението и представлява в същност съпротивлението, обусловено от коничността на

бандажите.

г. Съпротивление от триене на осовите шийки на колоосите в лагерите. Зависи главно от натиска, предаван от лагерните черупки върху основните шийки, от коефициента на триене в лагера (ϕ_n), от качеството и състоянието на смазочните материали (вискозитет, температура, дебелина на слоя и т. н.).

Съпротивлението от триенето в лагерите (W_Λ) се определя от равенството

$$W_\Lambda = P_n \phi_\Lambda \frac{d}{D}, \quad (\text{II-35})$$

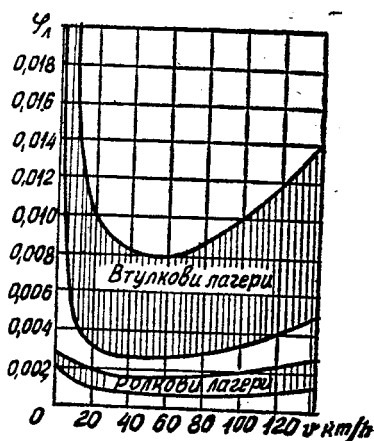
където

P_n е силата, с която чрез лагера се предава върху шийката на оста, N;

d — диаметърът на шийката на колооста, m;

D — диаметърът на бандажа на колооста, m.

Коефициентът на триене (ϕ_n) се изменя в доста широки граници и зависи от многобройни фактори. Показаните на фиг. II-5 криви дават известна представа за границите на изменение на ϕ_n в зависимост от скоростта на движение на състава при двата вида лагери - плъзгащи и търкалящи. Горните две криви обхващат експлоатационната зона на лагерите



Фиг. II-5

с триещи се повърхности, като горното ограничение се отнася за по-гъсти смазки и по-малки специфични налягания на триещите се повърхности, а долното — за по-редки смазки и по-големи специфични натоварвания.

Съпротивлението на търкаляне при ролковите лагери е много по-малко от съпротивлението на триене при плъзгащите лагери и почти не се променя в зависимост от скоростта на движението.

При престой на подвижен състав, който е съоръжен с плъзгащи лагери, намиращата се между лагерните черупки и осовите шийки смазка постепенно се изтласква извън допирните плоскости, в резултат на което смазващият слой изтънява. При потегляне след такива престои коефициентът на триене ϕ_n е 6—8 пъти по-голям от най-ниската си стойност.

2. Съпротивление на пътя. Типът и състоянието на релсовия път съществено влияят върху основното съпротивление на движението на влака.

Основните съставляващи на съпротивлението на пътя са:

а. Съпротивление от еластичното огъване на пътя. При преминаването на влака по релсовия път той се огъва под ходовите колела. Тъй като за огъването на релсите влакът извършва работа, това намалява неговата кинетична енергия, т.е. проявява се

съпротивителен ефект.

б. **Съпротивление от неравностите на пътя.** Движението на подвижния състав по релсите се придружава от удари на бандажите по релсовите връзки, удари на ребордите на бандажите по страничните стени на релсите и т.н. Всеки такъв удар предизвиква намаляване на скоростта на състава. За да се възстанови първоначалната скорост, необходимо е да се извърши допълнителна работа, поради което ударите на колелата по релсите могат да се разглеждат като съпротивление на движението.

3. **Съпротивление на въздушната среда.** Съпротивлението на въздушната среда на движението на състава се изразява с допълнително налягане на въздуха върху челната плоскост на локомотива или самоходния вагон, както и в появата на сили на триене между въздуха и страничните стени на влака (това се отнася за случаите на движение на влака при неподвижен въздух).

При попътен или насрещен вятър съпротивлението на въздушната среда се намалява или увеличава в зависимост от скоростта и посоката на вятъра.

Съпротивлението на въздушната среда зависи главно от големината и формата на челната повърхност на теглителния състав, от формата и количеството на прикачените вагони и от относителната (по отношение на въздуха) скорост на движение на влака. Когато тази скорост не надвишава 8—10 m/s, въздушното съпротивление може да се пренебрегне (това се прави при изчисленията на рудничния локомотивен транспорт, където скоростите на движение са още по-малки).

Голямото разнообразие и непостоянството на факторите, които влияят върху големината на основното съпротивление на движението, показва, че по пътя на чисто математичните изводи практически е невъзможно да се изведат формули, достатъчно точни и приложими за различните експлоатационни условия. По тази причина основното съпротивление на движението е прието да се изчислява чрез определения по емпирични формули относителен коефициент w_0 , който обобщава всички компоненти на основното съпротивление.

Емпиричните формули обикновено вземат пред вид влиянието на три основни фактора - типа на подвижния състав, масата и скоростта му. Те имат вида:

а. При влакове за открити рудници

За двусови вагони

$$w_0'' = \left(1,4 + 0,02 + \frac{0,5}{\frac{q}{g}} \right) 0,001. \quad (\text{II-36})$$

За четириосови вагони (колоосите групирани в две талиги):

При движение по постоянните релсови пътища на рудника

$$w_0'' = \left(0,7 + \frac{12 + 0,3v}{0,25 \frac{q}{g}} + 0,0002v^2 \right) \frac{1}{1000}. \quad (\text{II-37})$$

При движение по временни пътища, подсипани с баластра:

* Тъй като формулите са емпирични, за да се получи верен резултат, съобразен със системата СИ, v

и $\frac{q}{g}$ се заместват с посочената извънсистемна единица, а резултатът се умножава с 0,001.

$$w_0'' = \left(0,9 + \frac{15 + 0,4v}{0,25 \frac{q}{g}} + 0,00025v^2 \right) \frac{1}{1000}. \quad (\text{II-38})$$

При движение по временни пътища, на подсипани с баластра:

$$w_0'' = \left(1,1 + \frac{17 + 0,4v}{0,25 \frac{q}{g}} + 0,0003v^2 \right) \frac{1}{1000}. \quad (\text{II-39})$$

За електролокомотиви:

При тягов режим

$$w_0' = \left(2,4 - 0,007 \frac{P}{g} + 0,0013v^2 \right) \frac{1}{1000}. \quad (\text{II-40})$$

При движение по инерция

$$w_0' = \left(5 - 0,007 \frac{P}{g} + 0,0013v^2 \right) \frac{1}{1000}. \quad (\text{II-41})$$

В тези формули

$\frac{q}{g}$ е общата маса на вагона (празен или натоварен), Mg;

v - скоростта на движение, km/h;

$\frac{P}{g}$ - сцепната маса на локомотива, Mg;

P - сцепното тегло на локомотива, N.

Забележка. Формули (II-40) и (II-41) се отнасят за движение на локомотивите по нормални жп. линии. За да се отчете по-лошото състояние на релсовите пътища в откритите рудници, необходимо е получените по тях стойности за w_0' да бъдат увеличени с 20 – 80 %.

В откритите рудници релсовите пътища обикновено са в твърде лошо състояние, поради което скоростите на движение на влаковете са малки. При това положение влиянието на скоростта върху основното съпротивление на движението може да бъде пренебрегнато (още повече че разкривяването на пътя в план и профил и замърсяването му с посипала се от вагоните скална маса в значително по-голяма степен затруднява движението). За приблизителни изчисления общият относителен коефициент на основно съпротивление може да бъде избран в съответствие с табл.3.

Таблица 3

Вид на релсовия път	Относително основно съпротивление на движението (w_0)	
	За натоварен влак	За празен влак
Нормални жп линии, свързващи рудника с вън-шни обекти	0,002	0,003
Постоянни релсови пътища в открития рудник	0,003	0,0045
Временни релсови пътища в открития рудник	0,004	0,006

б. При влакове за подземни рудници. За рудничните теснолинейни вагони относителното основно съпротивление (w_0'') се приема в зависимост от товароподемността и състоянието на вагона (натоварен или празен), като влиянието на скоростта се пренебрегва. Препоръчват се следните ориентировъчни стойности за w_0'' :

за вагонетки еднотонни празни	0,011;
за вагонетки еднотонни натоварени	0,009;
за вагонетки двутонни празни	0,010;
за вагонетки двутонни натоварени	0,008;
за вагонетки тритонни празни	0,009;
за вагонетки тритонни натоварени	0,007;
за вагонетки петтонни празни	0,007;
за вагонетки петтонни натоварени	0,006.

Горните данни се отнасят за вагони, съоръжени с плъзгащи лагери. При търкалящи лагери стойностите на w_0' са с около 0,0015 - 0,002 по-малки.

На замърсени и недобре поддържани линии може да се очаква увеличение на основното съпротивление на движението до 40 - 50% спрямо посочените стойности.

Относителното основно съпротивление w_0' на рудничните теснолинейни локомотиви е приблизително от порядъка на относителното съпротивление на близките по тегло вагонетки.

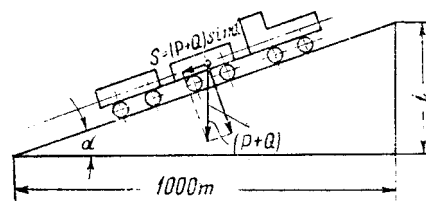
12. ДОПЪЛНИТЕЛНО СЪПРОТИВЛЕНИЕ НА ДВИЖЕНИЕТО

Основните съставлящи на допълнителното съпротивление на движението на влака са:

1. *Съпротивление от наклона на пътя.* Това е компонентата на силата на тежестта на влака, действаща по направлението на неговото движение. Характерно за тази сила е, че тя не зависи от типа и скоростта на подвижния състав и има постоянна посока, съдействаща за придвижването на влака надолу по наклона.

Ако α е ъгълът на наклона на релсовия път спрямо хоризонта (вж фиг. II-6), а $P+Q$ е теглото на влака, който се движи по този наклон, то компонентата на силата на тежестта по направлението на движението ще бъде

$$S = (P + Q) \sin \alpha. \quad (\text{II-42})$$



Фиг. II-6

При локомотивния транспорт наклоните на релсовия път са малки, поради което вместо в градуси те обикновено се изразяват в "хилядни" (‰) т.е. чрез денивелацията i . (измерена в метри), която пътят получава на разстояние 1000 m (измерено по хоризонтала) от изходната точка. От фиг. II-6 се вижда, че

$$\frac{i}{1000} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (\text{II-43})$$

Тъй като максимално допустимият наклон за магистралните жп линии е $i = 25 \text{ ‰}$, а за релсовите пътища в откритите рудници – $i = 40 \text{ ‰}$ (на което отговарят ъгли на наклона

съответно $1^{\circ}30'$ и $2^{\circ}20'$), то за тези малки значения на наклона $\sin\alpha = \operatorname{tg}\alpha$.

От горното следва, че форм. II-42 може да бъде представена във вида

$$S = (P + Q)\operatorname{tg}\alpha = (P + Q)\frac{i}{1000}. \quad (\text{II-44})$$

Очевидно компонентата S на силата на тежестта на влака ще препятствува или ще благоприятствува движението в зависимост от това, каква е неговата посока. Следователно, преценявана като съпротивление от движението по наклон W_i , тази компонента ще се характеризира с две стойности: положителна - при изкачване на влака по наклон, и отрицателна - при спускане на същия по наклон, т.е.

$$W_i = \pm S = \pm(P + Q)\frac{i}{1000}. \quad (\text{II-45})$$

Относителното съпротивление от движение по наклон съответно ще бъде

$$w_i = \frac{W_i}{(P + Q)} = \frac{\pm S}{(P + Q)} = \pm \frac{i}{1000}. \quad (\text{II-46})$$

2. *Съпротивление от кривите.* При навлизане на влака в крива той се стреми да продължи своето праволинейно движение, т.е. да се движи по тангентата на кривата. Вследствие на центробежните сили ребордите на колелата натискат външната релса, чиято реакция е равна по големина и противоположна на центробежната сила. Уравновесявайки се, двете сили предизвикват триене на ребордите във вътрешната страна на външната релса. Тази сила на триене е една от съставлящите на съпротивлението на кривите.

Друга съставляща на съпротивлението, възникваща при движение в криви, е надлъжното и напречното приплъзване или повличане на едно от колелата на всяка от колоосите при вписването ѝ в кривата. Практиката е показала, че съпротивлението на движението в криви почти не зависи от скоростта поради това, че с увеличаване на скоростта коефициентът на триене на плъзгане между колоосовите реборди и релсите намалява. Установено е, че съпротивлението на движението в крива зависи най-много от радиуса R на кривата.

Относителното съпротивление на движението в криви се изчислява по следните опитни формули:

а. За железопътен транспорт с нормална ширина на пътя (1435 mm) при криви с $R \geq 200\text{mm}$:

за двусови вагони

$$w'_{\text{кр}} = \frac{0,750}{R} = \frac{0,013 \cdot \alpha^0}{l_{\text{кр}}}; \quad (\text{II-47})$$

за четириосови вагони

$$w'_{\text{кр}} = \frac{0,630}{R} = \frac{0,011 \cdot \alpha^0}{l_{\text{кр}}}; \quad (\text{II-48})$$

за смесени състави

$$w'_{\text{кр}} = \frac{0,700}{R} = \frac{0,012 \cdot \alpha^0}{\ell_{\text{кр}}}, \quad (\text{II-49})$$

където

R е радиусът на кривата, m;

α^0 - централният ъгъл на кривата, градуси;

$l_{\text{кр}}$ - дължината на кривата, m.

Относителното съпротивление на движението от криви (при ширина на релсовия път 1435 mm) може да бъде изчислено и по формулата

$$w_{\text{кр}} = 0,001 \frac{S}{R} \left(180 - a \frac{S}{R} \right), \quad (\text{II-50})$$

където

S е твърдата база на подвижния състав (разстояние между осите на двуосов вагон, респ. между осите вталигите), m;

R - радиусът на кривата, m;

a - коефициент (за товарни влакове $a = 2000$).

б. За теснолинеен жп транспорт (каквото е локомотивният транспорт в подземните рудници) се използват следните формули за определяне относителното съпротивление на движение в криви в зависимост от широчината на пътя B :

$$\text{за } B=1000 \text{ mm:} \quad w_{\text{кр}} = \frac{0,400}{R - 20} \quad (\text{II-51})$$

$$\text{за } B=900 \text{ mm:} \quad w_{\text{кр}} = \frac{0,380}{R - 17} \quad (\text{II-52})$$

$$\text{за } B = 750 \text{ mm:} \quad w_{\text{кр}} = \frac{0,300}{R - 10} \quad (\text{II-53})$$

$$\text{за } B = 600 \text{ mm:} \quad w_{\text{кр}} = \frac{0,200}{R - 5} \quad (\text{II-54})$$

За двуосовите руднични локомотиви относителното съпротивление от кривите се определя по формулата

$$w_{\text{кр}} = \frac{0,158.S + 0,088.B}{R} \quad (\text{II-55})$$

където

S е твърдата база на локомотива, m;

B - — широчината на пътя, m.

При дължина на влака ℓ_B , по-голяма от тази на кривата $\ell_{\text{кр}}$ съпротивлението от кривата действа само на част от вагоните. За да се отчете това (при точни изчисления), изчисленото за целия влак съпротивление се намалява пропорционално на отношението, т.е.

$$W_{\text{кр}} = w_{\text{кр}} (P + Q) \frac{\ell_{\text{кр}}}{\ell_B} \quad (\text{II-56})$$

3. *Съпротивление от ускорението* (динамично съпротивление). Това в същност е силата на инерцията на влака, която се проявява, когато на него действуват положителни или отрицателни ускорения. Тази сила ще се проявява следователно в преходните (динамичните) режими на влака (потегляне, смяна на скорост, спиране) и третирана като съпротивление, ще носи знака на породилото я ускорение.

Силата на инерцията $S_{\text{ин}}$, както е известно, е право пропорционална на ускорението j , което външните сили съобщават на тялото, и на масата m . на самото тяло, т.е.

$$S_{\text{ин}} = m j \quad (\text{II-57})$$

Известно е също така, че поради своята същност силата на инерцията винаги се стреми да запази първоначалното състояние на тялото (покой или равномерно движение). Следователно външните сили ще променят скоростта на тялото v_1 на v_2 само ако извършат известна работа A за преодоляване на силата на инерцията. Докато трае процесът на изменение на скоростта, тялото ще измине път ℓ , а кинетичната му енергия ще се измени с

величината

$$\Delta E = \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2} m. \quad (\text{II-58})$$

При това кинетичната енергия ще се измени с величината, равна на извършената от външните сили работа за преодоляване силата на инерцията:

$$\Delta E = A = S_{\text{ин}} \ell. \quad (\text{II-59})$$

От форм. II-57 и II-58 следва, че

$$S_{\text{ин}} = m \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2\ell}. \quad (\text{II-60})$$

Направените дотук разсъждения и изведените равенства се отнасят за силата на инерцията, проявяваща се при простото постъпателно движение на хомогенно тяло с физична маса m .

За да бъде определена силата на инерцията, проявяваща се при преходните режими на движение на такова сложно тяло, каквото е влаковият състав (тази сила условно бе наречена “съпротивление от ускорението”), в горните равенства следва да се въведе “приведена маса” ($M_{\text{пр}}$) на състава. Известно е (вж. § 8), че посредством тази маса се отчитат действителните инерционни свойства на влака.

Тогава съобразените с тези свойства равенства (II-57) и (II-58) ще добият вида

$$S_{\text{ин}} = M_{\text{пр}} j = M(1 + \gamma)j \quad (\text{II-61})$$

и

$$S_{\text{ин}} = M_{\text{пр}} \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2\ell} = M(1 + \gamma) \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2\ell} \quad (\text{II-62})$$

Съдействувайки винаги за запазване първоначалното състояние на покой или на равномерно движение на влака, силите на инерция обективно ще препятствуват движението при потегляне и ускоряване и съответно ще благоприятствуват движението при забавяне. Следователно, преценявани като съпротивление на движението, те ще се характеризират с два знака: положителен - при ускоряване, и отрицателен - при забавяне.

От форм. II-61 и II-62 следва, че ускорението, което действа на влаковия състав по време на преходния режим на движението му, ще бъде

$$j = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2\ell}, \quad (\text{II-63})$$

където

v_1 е скоростта на състава в началото на преходния процес;

v_2 - скоростта на състава в края на преходния процес;

ℓ - пътът, изминат от състава през време на преходния процес.

От равенство (II-63) следва, че когато $v_2 > v_1$ (т.е. при ускоряване на влака), $j > 0$ и следователно и $S_{\text{ин}} > 0$ (вж. форм. II-61); когато $v_2 < v_1$ (т.е. при забавяне на влака), $j < 0$, поради което и $S_{\text{ин}} < 0$.

От изложеното дотук следва, че съпротивлението от ускоряване на влака съвпада не само по големина, но и по знак със силата на инерцията, т.е.

$$W_j = S_{\text{ин}} = \pm M(1 + \gamma)j, \quad (\text{II-64})$$

където j е абсолютната стойност на ускорението.

По дефиниция относителното съпротивление от ускорението на влака ще бъде

$$w_j = \frac{W_j}{P + Q} = \frac{\pm S_{\text{ин}}}{Mg}, \quad (\text{II-65})$$

където

$P+Q$ е общото тегло на влака, N;
 M - физичната маса на влака, kg;
 g - земното ускорение, $g=9,81 \text{ m/s}^2$.

От форм. (II-64) и (II-65) следва

$$w_j = \frac{\pm(1+\gamma)}{g} j. \quad (\text{II-66})$$

Общият за целия влак коефициент $(1+\gamma)$ се изчислява въз основа на равенството

$$(1+\gamma) = \frac{P(1+\gamma') + Q_1(1+\gamma_1'') + Q_2(1+\gamma_2'') + \dots + Q_n(1+\gamma_n'')}{P + Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}, \quad (\text{II-67})$$

където

P е теглото на локомотива;
 γ' - инерционният коефициент на въртящите се маси на локомотива;
 Q_1, Q_2, \dots, Q_n - теглото на отделните вагони, прикачени към локомотива;
 $\gamma_1'', \gamma_2'', \dots, \gamma_n''$ инерционните коефициенти на съответните вагони.

По-долу ориентировъчно се привеждат данни за инерционните коефициенти на локомотивите и вагоните.

самоходни вагони	$\gamma' = 0,10 \div 0,15$
електрически локомотиви	$\gamma' = 0,20 \div 0,40$
двусови товарни вагони (за нормален релсов път)	
празни	$\gamma'' = 0,10 \div 0,12$
натоварени	$\gamma'' = 0,04 \div 0,05$
Четириосови тоиарни вагони (за нормален релсов път:	
празни	$\gamma'' = 0,07 \div 0,08$
натоварени	$\gamma'' = 0,03 \div 0,04$
Теснолинейни руднични вагонетки	
празни	$\gamma'' = 0,10$
натоварени	$\gamma'' = 0,05$

При необходимост от точно определяне на съпротивлението от ускорение на влака препоръчва се изчисляването на инерционния коефициент да става в съответствие с форм. (II-9)—8.

В редица случаи обаче е достатъчно и приблизителното определяне W_j , поради което (от съображения за опростяване) се приема една средна стойност за коефициента $(1+\gamma)$, валидна както за празните, така и за натоварените състави. Обикновено се приема $(1+\gamma)=1,075$. Тогава за нуждите на приблизителните изчисления изразът за относителното съпротивление от ускорение (форм. II-66) ще добие вида

$$w_j = \pm \frac{1,075}{9,81} j \approx \pm 0,110 j. \quad (\text{II-68})$$

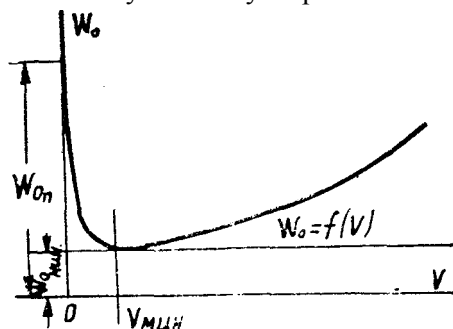
При рудничния локомотивен транспорт обикновено се използват следните пускови ускорения (j_n , m/s^2)

за пълни товарни влакове	0,10—0,20
за празни товарни влакове	0,15—0,30
за самоходни вагони	0,25—0,50
за единични електролокомотиви	0,50—0,70

При това по-големите стойности за j_n се отнасят за случаите на потегляне на хоризонтални площадки, (гари, депа, разминавки), а по-малките - за случаите на пускане

нагоре по ръководещия наклон.

При особено неблагоприятни условия (потегляне нагоре по максималния наклон) минимално допустимата стойност на пусковото ускорение на влака е $j_{\Pi}=0,05\div0,06\text{m/s}^2$



Фиг. II-7

4. *Съпротивление от потегляне на влака.* Всички досега изведени формули за основното и допълнителните съпротивления се отнасят за намиращия се в състояние на движение влак. Опитът обаче е показал, че освен тези съпротивления в момента на потеглянето и в началния период на ускоряването на влака се проявяват и други сили, наречени “съпротивление от потегляне” W_{Π} . Това съпротивление се обуславя от вида на лагерите, от вида и състоянието на смазката, както и от продължителността на престоя, предхождащ потеглянето.

На фиг. II-7 е показана кривата, която характеризира зависимостта на пълното съпротивление на движението на влака W_0 от скоростта на движението v . Вижда се, че при потегляне на влака W_0 отначало рязко намалява от началната стойност W_{0n} до минималната W_{0min} , след което започва плавно да нараства (пропорционално, на нарастването на скоростта), подчинявайки се на нормална емпирична зависимост.

Този характер на изменение на пълното съпротивление на движението се отнася за подвижен състав, чиито колооси са съоръжени с плъзгащи лагери. Съпротивлението от потегляне в същност представлява разликата

$$W_{\Pi} = W_{0n} - W_{0min} \quad (\text{II-69})$$

Достигането на скоростта, на която съответствува основното съпротивление W_{0min} (на фиг. II-7 това е скоростта v_{min}), фактически става, след като съответният вагон измине първите 1—2 m път.

Ако всички вагони на влака се привеждаха едновременно в движение, съпротивлението на потегляне от място би достигало твърде големи стойности. В действителност вагоните се привеждат в движение последователно поради провисването на тегличните устройства (спряговете) и наличието на хлабини в самите тях. При дълги и тежкотоварни влакове се прибегва до първоначално връщане на влака назад с цел да се раздвижат лагерите на първите вагони, да се предизвика отпускане на спряговете и да се създадат по този начин по-благоприятни условия за потегляне от място.

Относителното съпротивление от потегляне на влака с достатъчна точност може да бъде определено по формулата

$$w_{\Pi} = 0,002 + 0,003 \cdot i_{\Pi}, \quad (\text{II-70})$$

където i_{Π} е наклонът, по който влакът потегля, %.

Величината i_{Π} е въведена във форм. II-70, за да се отчете влиянието на наклона върху натегнатостта на тегличните устройства.

От форм. II-69 следва, че основното съпротивление при потегляне W_{0n} ще се определи от равенството

$$W_{0п} = W_{0min} + W_{п} \quad (II-71)$$

Ако разделим двете части на горното равенство на теглото на влака $P+Q$, ще получим

$$w_{0п} = w_{0min} + w_{п} \quad (II-72)$$

където

$w_{0п}$ е относителното основно съпротивление при потегляне;

w_{0min} – относителното основно съпротивление при скорост на движение v_{min} (вж. фиг. II-7.). Прието е w_{0min} да се определя за $v_{min} = 10 \text{ km/h}$.

При приблизителните изчисления съпротивлението от потегляне понякога се отчита чрез приемането на стойност за $w_{0п}$ в съответствие с израза

$$w_{0п} = (1,3 \div 1,5)w_0 \quad (II-73)$$

където w_0 е приетата стойност на относителното основно съпротивление от движението.

Характерно за съоръжението с търкалящи лагери влакове е, че при тях съпротивлението от потегляне практически не съществува.

От равенства (II-14) и (II-64) следва, че изразът за пълното съпротивление на движението на влака (форм. II-27) ще добие следния вид:

$$W = W_0 \pm W_i + W_{кр} \pm W_j + W_{п}. \quad (II-74)$$

Пълното относително съпротивление на движението съответно ще бъде

$$w = w_0 \pm w_i + w_{кр} \pm w_j + w_{п}. \quad (II-75)$$

13. СПИРАЧНА СИЛА

Спирачна се нарича изкуствено предизвиканата регулируема външна сила, която е насочена противоположно на посоката на движението на влака и служи за намаляване на неговата скорост.

По принцип спирачната сила на влака може да бъде създадена по следните начини:

1. Чрез притискане на специални челюсти (колодки): върху бандажите на колооста; върху специални, монтирани на колооста дискове и барабани; върху самите релси.

2. Чрез създаване на съпротивителен момент в самия локомотивен двигател (при тяговите електродвигатели - чрез поставянето им в генераторен режим или в режим на противовключване; при дизеловите и пневматичните двигатели - чрез поставянето им в компресорен режим и т.н.).

Спирачната сила, създавана по първия начин, се нарича “механична спирачна сила”, а устройствата, които я създават – “механични спирачки” (съответно: колесни, барабанны, дискови и релсови - в зависимост от вида на елемента, към който се притиска челюстта). При механичните спирачки кинетичната енергия се превръща в топлинна работа на триенето.

При електрическото спиране кинетичната енергия се превръща в електрическа, която може да бъде оползотворена (при евентуалното ѝ връщане в контактната мрежа) или изпратена в товарно съпротивление, където да се превърне в топлина.

При спирането осъществявано чрез поставянето на буталните локомотивни двигатели в компресорен режим, кинетичната енергия се превръща в топлина, която се разсейва в топлообменното устройство на двигателя.

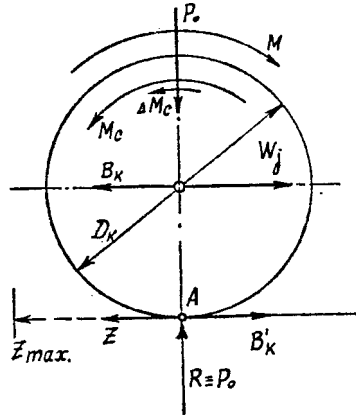
Спирачната сила на състава е резултат от действието на спирачните механизми на локомотива и вагоните, които при включване създават спирачни моменти върху осите на снабдените със спирачни съоръжения колела и колооси.

Механичните спирачни сили, както и спирачните сили, създадени чрез локомотивните двигатели, са регулируеми в определени граници съобразно с характеристиките на спирачните механизми и тези на локомотивните двигатели И тук, както и при реализирането на теглителната сила, за създаването на спирачно действие е необходимо да

има външна по отношение на състава сила.

Да разгледаме процеса на създаването на спирачната сила и факторите, определящи нейната максимална допустима стойност само за една спирачна колоос.

С притискането на колодките към въртящия се бандаж, спирачен диск или спирачен барабан, респ. с поставянето на локомотивния двигател в спирачен режим, в кръга на търкалянето на бандажите на колооста (вж. фиг. II-8) ще бъде създаден спирачен момент M_c , към който ще се прибави и обратният момент ΔM_c , произлизащ от съпротивлението на



Фиг. II-8

триене в лагерите.

Ако въртящата се колоос не опира върху релсите, моментите M_c и ΔM_c ще предизвикат спирането на колооста, като на рамата, към която тя е укрепена, не ще се предадат никакви надлъжни (т.е. успоредни на релсовия път) сили. Ако обаче колооста се търкаля върху релсите, спирачният момент $M'_c = M_c + \Delta M_c$ може да бъде представен като резултат от действието на двойката сили B_K и B'_K , първата от които е приложена в центъра на колелото, а втората - в точката на допиране на колелото с релсата (фиг. II-8). Вертикалният осов натиск P_0 ще предизвика появата на силата на сцеплението Z , която е реакция на силата B'_K и затова я уравновесява. Неуравновесена остава силата B_K , която по големина е равна на B'_K , но по посока е противоположна на посоката, в която се търкаля колооста. Чрез буксите на колооста тази сила се предава на рамата на локомотива (вагона) и предизвиква спирането. В същност външна по отношение на колооста е силата на реакцията на релсите Z , която е еднаква по посока и големина на силата B_K (вж. фиг. II-8). Последната от своя страна се определя в съответствие с равенството

$$B_K = B'_K = \frac{2M'_c}{D_K} = \frac{2(M_c + \Delta M_c)}{D_K}, \quad (II-76)$$

където D_K е диаметърът на кръга на търкалянето на бандажа.

Ако пренебрегнем спирачния момент, създаден от силите от триенето в лагерите на колооста (това се допуска, тъй като обикновено $\Delta M_c \leq (0,02+0,03) M_c$), равенството (II-76) ще добие вида

$$B_K = \frac{2M_c}{D_K}. \quad (II-77)$$

Максимално допустимата стойност на спирачната сила B_K се определя от изискването за осигуряване на нормално спиране на колооста.

Спирането на колооста е нормално, когато приложеният спирачен момент M_c не нарушава процеса на търкалянето й по релсите. И обратно, процесът на нормалното спиране е нарушен, когато колооста под действието на спирачния момент M_c преустанови

въртенето си, т.е. “блокира”. В първия случай спирачният момент запазва зададената му големина, тъй като:

а. При механичните спирачки между колодките и съответния въртящ се спирачен елемент (бандаж, диск или барабан) съществува плъзгане, в резултат на което съществува и механичната спирачна сила.

б. При спиране чрез двигателя (когато колооста е водеща) въртенето на колооста обуславя въртенето на двигателя и по този начин той проявява спирачното си действие.

Във втория случай (т.е. при блокиране на колооста) съществуването на механичната спирачна сила $B_{м1}$ респ. на спирачния момент на двигателя, се прекратява. Колооста обаче ще продължи да се движи с плъзгане върху релсите, докато запазената в нея кинетична енергия не се изразходва като работа за преодоляване на съпротивителните сили. Тъй като за разглеждания случай съпротивителни са силите на приплъзване между бандажите и релсите (които са значително по-малки от спирачната сила B_k), процесът на спирането се удължава и се съпровожда с нежелателно износване на бандажите и релсите.

Като се има пред вид, че в процеса на спирането движението на колооста се поддържа от силата на инерцията W_j (вж. фиг. II-8), изискването за нормално спиране съвпада с изискването за нормално търкаляне на колооста под действието на тази сила.

Известно е, че нормално търкаляне на колооста по релсата ще съществува, ако точката на контактуването A служи като моментен център за завъртане на колооста. Известно е също така, че тази точка ще послужи за моментен център на завъртане само ако приложените в нея сили взаимно се уравновесят. При спиране в тази точка (вж. фиг. II-8) действуват силата на сцеплението Z и тангенциалната спирачна сила B_k . Очевидно нормално търкаляне на колооста при спиране и следователно нормално спиране на същата ще бъде осигурено при спазване на равенството

$$B_k' = Z \quad (II-79)$$

Като се има пред вид, че B_k' е регулируемата сила, а Z е нейната реакция, за която е характерно, че притежава горна гранична стойност Z_{max} , компенсирането на спирачната сила, действаща в т. А ще бъде осигурено само ако тя получава стойности, удовлетворяващи неравенството

$$B_k \leq Z_{max} = P_0 \psi. \quad (II-80)$$

Ако умножим двете страни на неравенството с броя на спирачните колооси $n_{сп}$ ще получим

$$B \leq P_{сп} \psi, \quad (II-81)$$

където

$B = n_{сп} B_k'$ е сумарната спирачна сила;

$P_{сп} = n_{сп} P_0$ - спирачното тегло;

ψ коефициент на сцепление между бандажите и релсите.

14. АНАЛИЗ НА ОСНОВНОТО УРАВНЕНИЕ ЗА ДВИЖЕНИЕТО НА ВЛАКА

При извеждането на основното уравнение за движението на влака (форм. II-14) с F условно бе означена резултантната на всички действащи на състава активни сили, а с ΣW - резултантната на всички реактивни сили. Тъй като впоследствие (вж. 7) бе прието променливите по характер сили (т.е. силите, които при едни условия са активни, а при други - съпротивителни) да бъдат разглеждани като компоненти на пълното съпротивление на движението W , смисълът на членовете на основното уравнение за движението на влака трябва да бъде уточнен, както следва:

F е резултантната на теглителните сили, създавани от водещите колооси на теглителния състав;

$M_{\text{пр}} \frac{dv}{dt}$ - съпротивлението от ускорението на влака W_j ;

ΣW - резултантната на статичните съпротивления на движението на влака.

$$\Sigma W = W - W_j = W_0 \pm W_i + W_{\text{кр}} + W_{\text{п}}. \quad (\text{II-82})$$

Процесът на движението на влака се характеризира със следните три основни режима: теглене (тягов режим), свободно движение и спиране.

а. **Теглене** (тягов режим). При този режим източникът на двигателната енергия на подвижния състав (електрическата енергия при електролокомотивите, парата - при парните локомотиви, сгъстеният въздух при пневматичните локомотиви и топлинната енергия на химичното гориво при дизеловите локомотиви) се превръща в механична работа и се изразходва за потегляне, ускоряване и движение на влака, при което се преодоляват съответните съпротивителни сили.

Уравнението за движението на влака при този режим има вида

$$F - \Sigma W = M(1 + \gamma) \frac{dv}{dt} \quad (\text{II-83})$$

или решено по отношение на ускорението:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F - \Sigma W}{(1 + \gamma)M}. \quad (\text{II-84})$$

Изменението на скоростта на движението на влака изцяло зависи от разликата $F - \Sigma W$, която се нарича “остатъчна” или “ускоряваща” сила.

Ако $F - \Sigma W > 0$, и $\frac{dv}{dt} > 0$ и локомотивът ще бъде в състояние да ускори влака и да осъществи по този начин потегляне от място или увеличаване на скоростта на движението.

Ако $F - \Sigma W < 0$, и $\frac{dv}{dt} < 0$ и следователно на влака ще се съобщава закъснение. Ако той се е намирал в движение, това ще доведе до намаляване на неговата скорост.

Ако $F - \Sigma W = 0$, и $\frac{dv}{dt} = 0$ и следователно влакът ще запази неизменна скоростта си, в случай че се движи, но не ще бъде в състояние да потегли, ако е в покой.

б. **Свободно движение**. При този режим източникът на двигателна енергия е изключен и следователно $F = 0$. Движението на влака продължава под действието на силите на инерцията. Необходимата работа за преодоляване на съпротивителните сили се извършва за сметка на запасената във влака кинетична енергия.

Уравнението за движението на влака при този режим има вида

$$-\Sigma W = M(1 + \gamma) \frac{dv}{dt} \quad (\text{II-85})$$

или

$$\frac{dv}{dt} = \frac{-\Sigma W}{M(1 + \gamma)}. \quad (\text{II-86})$$

От равенства (II-86) и (II-82) следва, че

$$\frac{dv}{dt} = \frac{-(W_0 \pm W_i + W_{\text{кр}})}{M(1 + \gamma)}. \quad (\text{II-87})$$

Анализът на равенство (II-87) показва, че свободното движение на влака може да бъде равномерно, закъснително или ускорително.

Свободното движение ще бъде равномерно, ако влакът се спуска по наклон и ако големината на този наклон е такава, че $W_i = W_0 + W_{кр}$

При това положение $-(W_0 - W_i + W_{кр}) = 0$ (вж. форм. II-87) и $\frac{dv}{dt} = 0$.

Свободното движение ще бъде закъснително, ако влакът, се движи по хоризонтален участък ($W_i = 0$), ако изкачва наклон (т.е. $W_i > 0$) или ако се спуска по наклон, чиято големина е такава, че $W_i < W_0 + W_{кр}$

При всички тези случаи числителят на равенство (II-87) ще бъде < 0 и следователно и $\frac{dv}{dt} < 0$.

Свободното движение ще бъде ускорително, ако влакът се спуска по наклон с такава големина, че $W_i > W_0 + W_{кр}$. При това положение $-(W_0 - W_i + W_{кр}) > 0$ следователно $\frac{dv}{dt} > 0$ (вж. форм. II-87).

в. **Спиране** (спирачен режим). При него източникът на двигателна енергия на подвижния състав е изключен (както при свободното движение), а големината на резултантната на съпротивителните сили изкуствено се увеличава чрез създаването на допълнителна регулируема съпротивителна сила чрез спирачките на влака или чрез двигателите на подвижния състав.

Спирачният режим се налага в следните случаи:

- при необходимост от поддържане на определена, постоянна скорост на движение на състава, когато последният се намира в режим на свободно, ускоряващо се движение;
- при необходимост от понижаване скоростта на движение на състава;
- при необходимост от пълно спиране на влака.

Уравнението на движението на влака при този режим има вида

$$-(\sum W + B) = (1 + \gamma)M \frac{dv}{dt} \quad (\text{II-88})$$

или

$$\frac{dv}{dt} = \frac{-(\sum W + B)}{M(1 + \gamma)} = \frac{-(W_0 \pm W_i + W_{кр} + B)}{M(1 + \gamma)} \quad (\text{II-89})$$

където B е резултантната спирачна сила на целия влаков състав.

Анализът на равенство (II-89) показва, че движението при спирачен режим може да бъде равномерно, закъснително и ускорително.

Движението ще бъде равномерно, ако влакът се спуска по наклон и ако големината на спирачната сила е така избрана, че $W_i = W_0 + W_{кр} + B$.

При това положение $-(W_0 - W_i + W_{кр} + B) = 0$ и следователно $\frac{dv}{dt} = 0$ (форм. II-89).

Движението ще бъде закъснително, ако влакът се движи по хоризонтален участък ($W_i = 0$), ако изкачва наклон ($W_i > 0$) или ако се спуска по наклон, но спирачната сила е така избрана, че $W_i < W_0 + W_{кр} + B$. И при трите случая на движение числителят на равенство (II-89) ще бъде < 0 и следователно и $\frac{dv}{dt} < 0$.

Движението при спирачен режим ще бъде ускорително, ако влакът се спуска по наклон и ако спирачната сила се оказва с недостатъчна големина, така че $W_i > W_0 + W_{кр} + B$. В този случай $-(W_0 - W_i + W_{кр} + B) > 0$ и следователно $\frac{dv}{dt} > 0$ (форм. II-89).