

Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Уральский государственный университет путей сообщения  
Кафедра «Электрическая тяга»

Э.И. Бегагоин  
Н.О. Фролов  
И.Н. Пампурин

# ТЯГА ПОЕЗДОВ

Екатеринбург  
2006

Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Уральский государственный университет путей сообщения  
Кафедра «Электрическая тяга»

Э.И. Бегагоин  
Н.О. Фролов  
И.Н. Пампурин

## ТЯГА ПОЕЗДОВ

Методическое пособие к лекционному курсу по дисциплине  
«Тяга поездов» для студентов всех форм обучения специальностей 190701,  
«Управление процессами перевозок», 280102 «Безопасность технологических  
процессов и производств» и 280202 «Инженерная защита окружающей среды»

II часть

Екатеринбург

2006

УДК 629.4.012  
Б37

Методическое пособие составлено в соответствии с учебным планом и предназначено для закрепления и углубления знаний по дисциплине «Тяга поездов». В методическом пособии рассмотрены вопросы процессов образования и расчета сил, действующих на поезд, математического моделирования движения поезда с решением основного уравнения движения поезда, а также тяговые расчеты железнодорожного участка. Кроме того, пособие будет полезно при выполнении курсовой работы по дисциплине «Тяга поездов».

Пособие оформлено в соответствии с ГОСТ 2.105 – 95 ЕСКД «Общие требования к текстовым документам» и предназначено для студентов всех форм обучения специальностей 190701 – «Управление процессами перевозок», 280102 - «Безопасность технологических процессов и производств» и 280202 - «Инженерная защита окружающей среды».

Методическое пособие одобрено и утверждено на заседании кафедры «Электрическая тяга», протокол № 12 от 8.06.2006 г.

Авторы: Э.И. Бегагоин, доцент кафедры «Электрическая тяга», канд. техн. наук, УрГУПС,

Н.О. Фролов, ст. преподаватель кафедры «Электрическая тяга», канд. техн. наук, УрГУПС,

И.Н. Пампурин, ассистент кафедры «Электрическая тяга», УрГУПС.

Рецензент: В.А. Усов, доцент кафедры «Электрическая тяга», канд. техн. наук, УрГУПС.

## Содержание

Введение.....	4
1 Физическая модель поезда.....	5
1.1 Силы, действующие на поезд.....	5
1.2 Сила тяги.....	7
1.3 Сила сопротивления движению поезда.....	12
1.4 Тормозная сила при механическом торможении поезда.....	15
1.5 Диаграмма удельных сил поезда.....	19
1.6 Сила инерции.....	20
1.7 Физическая модель поезда.....	20
2 Математическая модель поезда.....	22
2.1 Основное уравнение движения поезда.....	22
2.2 Математическая модель процесса движения поезда.....	24
2.3 Блок-схема математической модели процесса движения поезда.....	25
2.4 Интегрирование основного уравнения движения поезда.....	26
3 Тяговые расчеты.....	29
3.1 Постановка задачи.....	29
3.2 Определение расчетной массы состава.....	29
3.3 Построение диаграммы основных удельных результирующих сил поезда.....	33
3.4 Решение тормозной задачи.....	34
3.5 Построение кривых движения поезда.....	37
3.6 Оценка полученных результатов.....	42
3.7 Использование результатов тяговых расчетов.....	43
Список использованных источников.....	43

## Введение

Тяга поездов – это учебная дисциплина, изучающая процессы образования и изменения сил, действующих на поезд, а также закономерности движения поезда под действием этих сил.

Прикладную часть этой дисциплины называют «тяговые расчеты», основной задачей которых является определение зависимостей между физическими величинами, характеризующими движение поезда, а также определение при этом эксплуатационных и энергетических показателей работы локомотивов. Нормативы расчетных величин и методика тяговых расчетов утверждаются ОАО «РЖД», имеют силу отраслевого стандарта и называются «Правила тяговых расчетов для поездной работы» (ПТР) /1/.

Основу тяговых расчетов составляет построение кривых движения поезда:  $V(S)$  – зависимость скорости движения поезда от пути,  $t(S)$  – зависимость времени движения поезда от пути. В ПТР приведен достаточно трудоемкий графоаналитический метод построения кривых движения поезда. В настоящее время уже имеется множество компьютерных программ, позволяющих автоматизировать процесс тяговых расчетов, существенно снизить их трудоемкость, а, значит, проводить многовариантные расчеты с целью выбора наиболее оптимального из них по тем или иным критериям.

В данном пособии по изучению раздела «Тяга поездов» в учебных целях изложен графоаналитический метод построения кривых движения поезда.

# 1 Физическая модель поезда

## 1.1 Силы, действующие на поезд

Одной из основных сил, действующих на поезд, является сила тяги локомотива  $F_K$ . Сила  $F_K$  образуется при работе тяговых электродвигателей (ТЭД) после подключения их к питающей сети: на валу якоря каждого ТЭД создается вращающий момент  $M_{вр.я.i}$ , который через зубчатую передачу передается на колесную пару, где преобразуется в силу  $F_{к.дв.i}$ , приложенную к оси колесной пары и называемой силой тяги двигателя. Силы тяги всех двигателей суммируются вначале на тележках локомотива через буксовые узлы, а затем на кузове локомотива через шкворневые опоры, и таким образом на автосцепке локомотива образуется сила тяги  $F_K$ , под действием которой и возникает движение поезда со скоростью  $V$  в направлении действия силы тяги (рисунок 1.1).

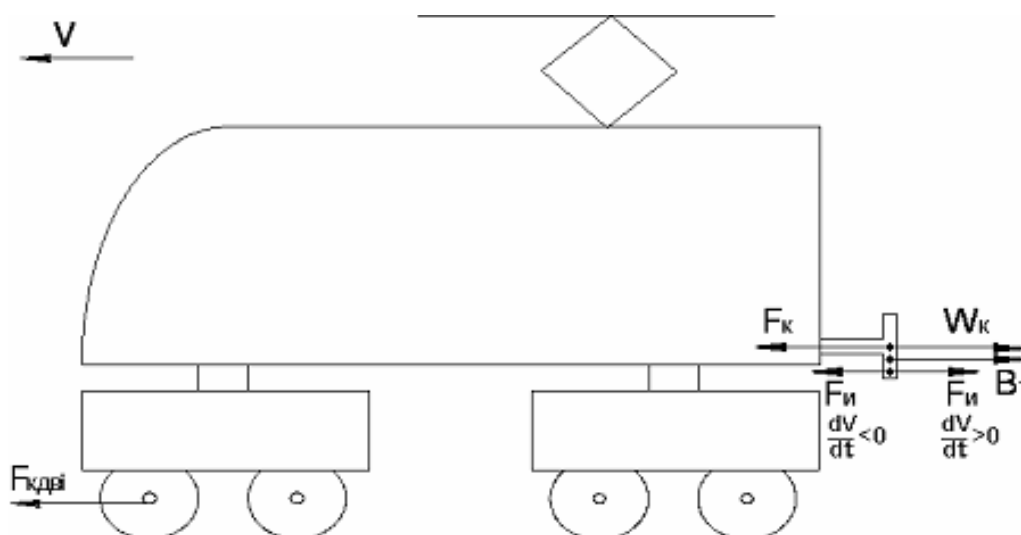


Рисунок 1.1 – Силы, действующие на поезд

Как только начинается движение поезда, то во всех трущихся его частях (в таких механических парах, как колесо – рельс, ось колесной пары – буксовый подшипник, элементы рессорного подвешивания и т. д.) образуются силы трения, на преодоление которых расходуется часть силы тяги, и которые таким образом создают сопротивление движению поезда. Сюда же относятся потери кинетической энергии движения поезда от ударов на стыках, неровности и неравноупругости пути, от соударения подвижного состава при неравномерном движении, сопротивление воздушной среды и т. д. Все эти виды сопротивления движению поезда оцениваются с помощью силы  $W_K$ , которая называется силой сопротивления движению и направлена в противоположную сторону действия силы тяги  $F_K$ .

В тех случаях, когда необходимо существенно снизить скорость движения поезда или даже остановить его на заданном раздельном пункте, применяется специально созданная механическая сила  $B_T$ , называемая тормозной силой. Эта сила создается с помощью специальных устройств (автотормозов) путем прижатия тормозных колодок к бандажам колесных пар подвижного состава. Направление действия силы  $B_T$  противоположно направлению действия силы тяги  $F_K$  и соответственно направлению движения поезда.

Из законов механического движения известно, что при движении любого тела возникает так называемая сила инерции  $F_{II}$ , вызванная накопленной в процессе движения этого тела кинетической энергией. Таким образом, сила инерции  $F_{II}$  возникает всякий раз, когда имеет место изменение скорости движения поезда. При этом сила инерции будет направлена по направлению движения поезда, если скорость движения поезда снижается, и навстречу движению поезда, если скорость поезда возрастает.

Итак, силы тяги, сопротивления движению поезда и торможения являются внешними силами, действующими на поезд, а сила инерции – это внутренняя сила поезда.

В общем случае все внешние силы поезда суммируются и потому могут быть заменены одной силой  $F$ , называемой равнодействующей

$$F = F_K - W_K - B_T. \quad (1.1)$$

Очевидно, силы тяги и торможения одновременно не применяются. Поэтому по их наличию или отсутствию различают следующие три возможных режима ведения поезда:

а) режим тяги

$$F_T = F_K - W_K, \quad (1.2)$$

б) режим выбега

$$F_B = -W_K, \quad (1.3)$$

в) режим торможения

$$F_{TOP} = -W_K - B_T. \quad (1.4)$$

Чередую все эти три режима в разной последовательности, машинист осуществляет управление процессом движения поезда на участке по заданному алгоритму.

Для удобства производства тяговых расчетов используют удельные силы, т. е. силы, отнесенные к массе поезда:

а) удельная сила тяги

$$f_K = \frac{F_K}{mg}, \text{ Н/кН}, \quad (1.5)$$

б) удельная сила сопротивлению движению поезда

$$w_K = \frac{W_K}{mg}, \text{ Н/кН}, \quad (1.6)$$

в) удельная тормозная сила

$$b_k = \frac{B_k}{mg}, \text{ Н/кН}, \quad (1.7)$$

г) удельная равнодействующая сила поезда

$$f = \frac{F}{mg}, \text{ Н/кН}, \quad (1.8)$$

где  $g = 9,81$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;

$m$  – масса поезда, т;

$$m = m_{\text{л}} + m_{\text{с}}, \quad (1.9)$$

где  $m_{\text{л}}$  – масса локомотива, т;

$m_{\text{с}}$  – масса состава, т.

Рассмотрим подробнее образование и определение всех вышеуказанных сил, действующих на поезд.

## 1.2 Сила тяги

### 1.2.1 Основной закон локомотивной тяги

Как известно, источником механической энергии для создания силы тяги на локомотиве являются электродвигатели (ТЭД), которые располагаются на тележках локомотива и будучи подключенными к источнику электроэнергии создают на валах своих якорей вращающие моменты  $M_{\text{я}}$ . Последние через зубчатые передачи образуют на колесных парах вращающие моменты  $M_{\text{к}}$ . Рассмотрим образование силы тяги на примере одной колесной пары (рисунок 1.2).

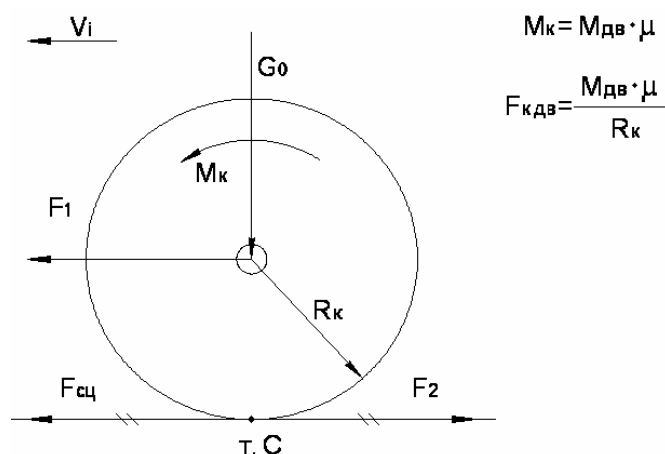


Рисунок 1.2 – Образование силы тяги

Здесь  $G_0$  – сила тяжести локомотива, приходящаяся на одну ось колесной пары (или сила нажатия колеса на рельс), кН.



$$G_0 = \frac{m_L \cdot g}{N_{0L}}, \quad (1.10)$$

где  $N_{0L}$  – число движущих осей локомотива.

Вращающий момент колесной пары может быть заменен парой сил  $F1$  и  $F2$ . При этом сила  $F1$  приложена к оси колесной пары, а сила  $F2$  – к рельсу в точке «С» касания колеса и рельса. Очевидно,

$$F1 = F2 = F_{K.ДВ}. \quad (1.11)$$

В соответствии с 3-м законом Ньютона в точке «С» возникает реактивная сила  $F_{СЦ}$ , которая уже приложена к колесу, равна по величине силе  $F2$ , но противоположна ей по направлению. Таким образом, силы  $F2$  и  $F_{СЦ}$  взаимно уравновешивают друг друга, т. е. нижняя точка колеса как бы фиксируется на рельсе, и тогда под действием силы  $F1$  ось колесной пары перемещается влево: начинается перекатывание колеса по рельсу, т. е. поступательное движение локомотива с составом с какой-то скоростью  $V_i$ . При этом сила тяги локомотива  $F_K$  равна

$$F_K = N_{0L} \cdot F_{K.ДВ}. \quad (1.12)$$

Силу  $F_{СЦ}$  называют силой сцепления (колеса с рельсом). В результате образования именно этой силы создается мгновенный центр вращения колеса в точке «С», и происходит преобразование вращающего момента колесной пары в силу тяги  $F_{K.ДВ}$ . При нормальном движении всегда

$$F_{K.ДВ.i} = F_{СЦ.i}. \quad (1.13)$$

Условием же нормального движения (без боксования) является следующее условие:

$$F_{K.ДВ.i} \leq F_{СЦ.МАХ}, \quad (1.14)$$

где  $F_{СЦ.МАХ}$  – максимально возможная (потенциальная) сила сцепления колеса и рельса.

$$F_{СЦ.МАХ} = 1000 \cdot G_0 \cdot \psi_K, \quad (1.15)$$

где  $\psi_K$  – коэффициент сцепления колеса и рельса.

Из (1.14) и (1.15) следует

$$F_{K.ДВ.i} \leq 1000 \cdot G_0 \cdot \psi_K. \quad (1.16)$$

Выражение (1.16) – есть основной закон локомотивной тяги: для получения нормального движения (без боксования) сила тяги двигателя должна быть меньше или, в крайнем случае, равна максимально возможной (потенциальной) силе сцепления колеса с рельсом!

## 1.2.2 Коэффициент сцепления

Физическая природа коэффициента сцепления та же, что и коэффициента трения двух поверхностей, но имеет свою специфику.

Под действием вертикальной нагрузки  $G_0$  от колеса на рельс происходит упругая деформация металла, в результате которой образуется небольшая контактная площадка, называемая контурной. Поверхности колес и рельсов имеют шероховатости, поэтому давление воспринимается отдельными выступами так, что площадь истинного контакта составляет всего 10% контурной площадки. При этом под действием вертикальной нагрузки происходит взаимное внедрение неровностей колеса и рельса, возникает зацепление микроповерхностей – чисто механическое противодействие смещению поверхностей колеса и рельса. Кроме того, в результате сжатия микровыступов происходит еще и пластическая деформация, при которой связь соприкасающихся поверхностей колеса и рельса обусловлена еще и их молекулярным взаимодействием.

Итак, явление сцепления колеса с рельсом имеет двойственную механико-молекулярную физическую природу. Кроме того, имеет место и так называемые упругие скольжения колеса и рельса, направленные в противоположные стороны, что приводит к появлению трения скольжения.

Коэффициент сцепления  $\psi_K$  определяется опытным путем как отношение наибольшей реализуемой в эксплуатации силы тяги локомотива к силе тяжести локомотива

$$\psi_K = \frac{F_{КНБ}}{G_L}. \quad (1.17)$$

Такой коэффициент сцепления называется расчетным. Эксперименты показали, что он ( $\psi_K$ ) зависит от скорости движения поезда и в общем случае может быть определен по следующей эмпирической формуле:

$$\psi_K = a + \frac{b}{100 \cdot c + d \cdot V} - e \cdot V, \quad (1.18)$$

где значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  определяются серией локомотива и приводятся в ПТР.

Графическая интерпретация выражения (1.18) выглядит так, как показано на рисунке 1.3.

## 1.2.3 Боксование

Боксование – это срыв сцепления колеса с рельсом, когда окружная скорость колесной пары оказывается больше, чем линейная скорость движения локомотива, В результате этого возникает проскальзывание колеса относительно рельса.

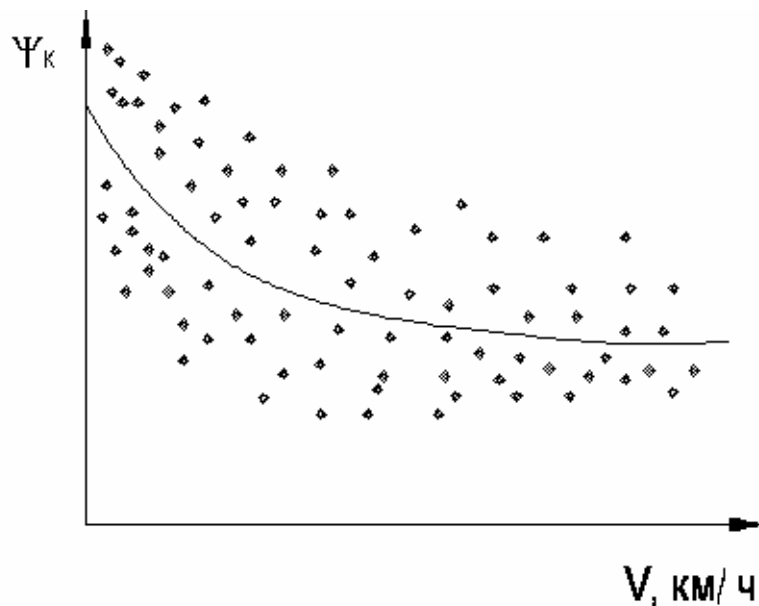


Рисунок 1.3 – Зависимость коэффициента сцепления от скорости поезда

Физическая природа боксования – превышение силы тяги над потенциальной силой сцепления колеса с рельсом, что является следствием:

- резкого уменьшения коэффициента сцепления (например, масляное пятно на рельсе);
- скачкообразного возрастания силы тяги из-за толчка (броска) тока тягового двигателя;
- резкого снижения осевой нагрузки  $G_0$  колесной пары:
  - а) при колебаниях надрессорного строения тележек локомотива при прохождении им неровностей пути;
  - б) при перераспределении осевых нагрузок между передней и задней по ходу движения колесными парами, что имеет место при реализации силы тяги локомотива.

Возможные последствия боксования:

- потеря силы тяги локомотива;
- повышенный износ бандажей колесных пар;
- размотка бандажа якоря ТЭД;
- срыв коммутации ТЭД с «круговым огнем» по коллектору.

#### 1.2.4 Тяговые характеристики локомотива

Тяговая характеристика локомотива – это зависимость силы тяги  $F_K$  локомотива от скорости  $V$  движения поезда:  $F_K(V)$ , при постоянном напряжении на ТЭД.

Очевидно, тяговая характеристика локомотива определяется тяговой характеристикой электродвигателя, в качестве которого в настоящее время на всех локомотивах применяется практически один тип электродвигателя – ТЭД постоянного тока последовательного возбуждения.

$$U_{дв} = E + R_{дв} \cdot I_{дв}, \quad (1.19)$$

$$E = C \cdot \Phi \cdot V, \quad (1.20)$$

$$V = \frac{U_{дв} - R_{дв} \cdot I_{дв}}{C \cdot \Phi}, \quad (1.21)$$

$$F_{кдв} = 3,6 \cdot C \cdot \Phi \cdot I, \quad (1.22)$$

$$C = \frac{1}{3,6} \cdot \frac{p \cdot N}{\pi \cdot a_{ПАР}} \cdot \frac{\mu}{D_K}. \quad (1.23)$$

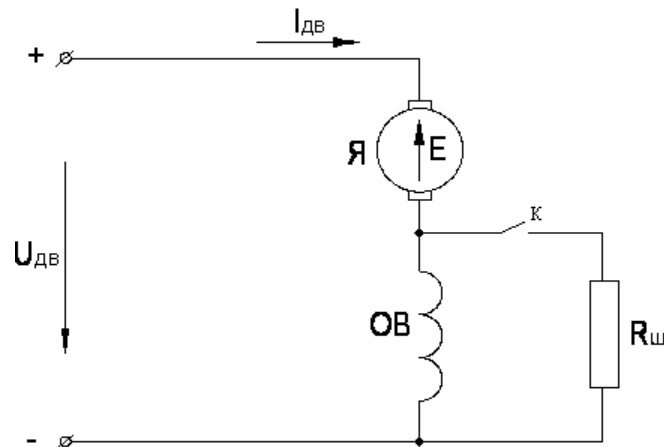


Рисунок 1.4 – Принципиальная электрическая схема электровоза постоянного тока

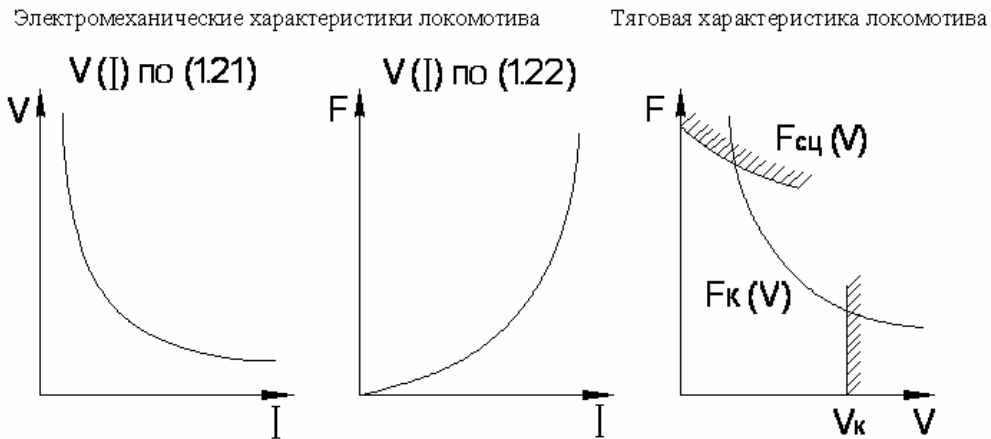


Рисунок 1.5 – Характеристики локомотива с ТЭД последовательного возбуждения

На тяговую характеристику накладываются ограничения (рисунок 1.5):

- а) по сцеплению – по (1.15);
- б) по конструкционной скорости  $V_K$  локомотива.

### 1.3 Сила сопротивления движению поезда

Сила сопротивления движению поезда – это приведенная к ободу колес эквивалентная сила, на преодоление которой затрачивается та же работа, что и на преодоление всех действительных сил, противодействующих движению.

Различают два вида сопротивления движению поезда – основное  $W_0$  и дополнительное  $W_D$

$$W_K = W_0 + W_D. \quad (1.24)$$

К основному сопротивлению движению подвижного состава относятся сопротивления, которые имеют место всегда при движении поезда на прямом и горизонтальном участках пути при нормальных метеорологических условиях.

Это:

– сопротивление трения шеек осей колесных пар в буксовых подшипниках;

– сопротивление трения качения колес по рельсу (от упругого скольжения);

– сопротивление трения скольжения колес по рельсам (вызвано поперечным проскальзыванием и перемежающимся соприкосновением гребня колесной пары с рельсом из-за конической формы поверхности бандажа колесной пары);

– сопротивление от рассеяния энергии подвижным составом и верхним строением пути (вызвано ударами на стыках рельсов, неравноупругостью и неровностью пути в плане и профиле, колебаниями надрессорного строения подвижного состава и т. д.);

– сопротивление воздушной среды (от скоростного напора воздуха на лобовую поверхность локомотива, от завихрений и разрежений воздуха у задней стенки хвостового вагона, от трения воздушных струй о боковую поверхность подвижного состава, от турбулентных потоков воздуха в междвагонных пространствах).

Основное сопротивление движению подвижного состава определяется опытным путем, является функцией скорости движения поезда и графически изображается так, как показано на рисунке 1.6.

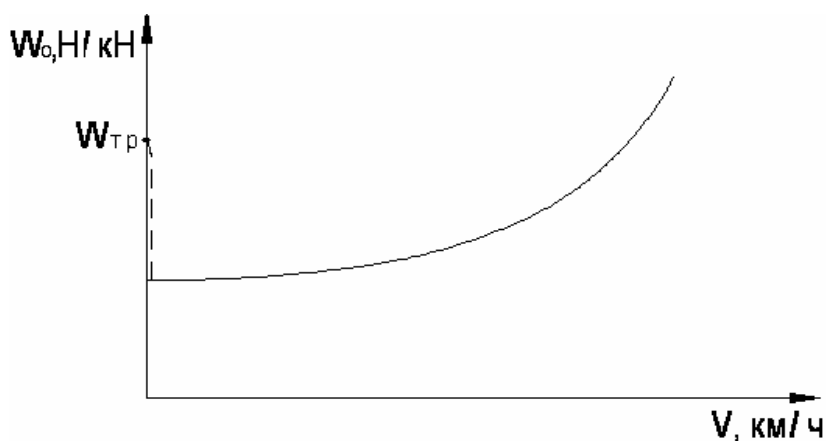


Рисунок 1.6 – Зависимость основного сопротивления движению от скорости поезда

При этом основное сопротивление оценивается в удельной форме и для приведенной зависимости подобрана следующая эмпирическая формула:

$$w_0 = a + b \cdot V + c \cdot V^2, \quad (1.25)$$

где конкретные значения коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $c$  приводятся в ПТР, определяются типом подвижного состава, конструкцией верхнего строения пути, а также режимом работы для локомотивов и осевой нагрузкой для вагонов.

Основное сопротивление движению подвижного состава обозначается:

$w_x$  – для локомотивов в режиме холостого хода, Н/кН;

$w_0'$  – для локомотивов в режиме тяги, Н/кН;

$w_0''$  – для состава (вагонов), Н/кН.

Если состав содержит разнотипные вагоны (например, четырех и восьмиосные), то порядок определения удельного основного сопротивления движению состава следующий

$$w_0'' = \sum (\alpha_i \cdot w_{0i}''), \quad (1.26)$$

где  $w_{0i}''$  – удельное основное сопротивление движению вагона  $i$ -го типа, Н/кН;

$\alpha_i$  – доля вагонов  $i$ -го типа (по массе) в составе.

Очевидно

$$\sum \alpha_i = 1. \quad (1.27)$$

Тогда удельное основное сопротивление движению поезда определится как:

а) в режиме тяги локомотива

$$w_0 = \frac{m_L \cdot w_0' + m_C \cdot w_0''}{m_L + m_C}, \quad (1.28)$$

б) в режиме холостого хода локомотива

$$w_{0x} = \frac{m_L \cdot w_x + m_C \cdot w_0''}{m_L + m_C}. \quad (1.29)$$

Примечание.

Разновидностью основного сопротивления движения поезда является сопротивление троганию поезда с места –  $w_{TP}$ , Н/кН. Его особенностью является то, что оно намного больше, чем то, которое определяется по формуле (1.25), при  $V = 0$ . Объясняется это тем, что во время стоянки прекращается гидродинамическое давление масляного клина между шейкой оси колесной пары и подшипником, образуемое всегда при движении подвижного состава. Поэтому при трогании в буксовых узлах имеет место полусухое трение. Кроме того, за время стоянки уменьшается температура масла и значит повышается его вязкость. Из сказанного следует, что величина сопротивления при трогании подвижного состава с места зависит от типа подшипника (скольжения или роликовый) и осевой нагрузки. Формулы для определения удельного сопротивления

троганию подвижного состава на площадке приводятся в ПТР. Например, для подвижного состава на подшипниках качения

$$w_{TP} = \sum (\alpha_i \cdot w_{TP,i}), \quad (1.30)$$

где

$$w_{TP,i} = \frac{28}{m_{0i} + 7}, \quad (1.31)$$

где  $m_{0i}$  – осевая нагрузка вагона  $i$ -го типа, т.

Дополнительным сопротивлением движению поезда называют временно действующее сопротивление, возникающее только в определенных условиях движения поезда. К дополнительным сопротивлениям движению поезда относят сопротивления от уклонов  $w_i$ , кривых  $w_{KP}$ , низкой температуры  $w_T$  и ветра  $w_B$

$$w_D = w_i + w_{KP} + w_T + w_B. \quad (1.32)$$

При движении поезда по уклону имеет место разложение силы тяжести  $G$  поезда на две составляющих, одна из которых представляет собой дополнительное сопротивление  $W_i$  (рисунок 1.7).

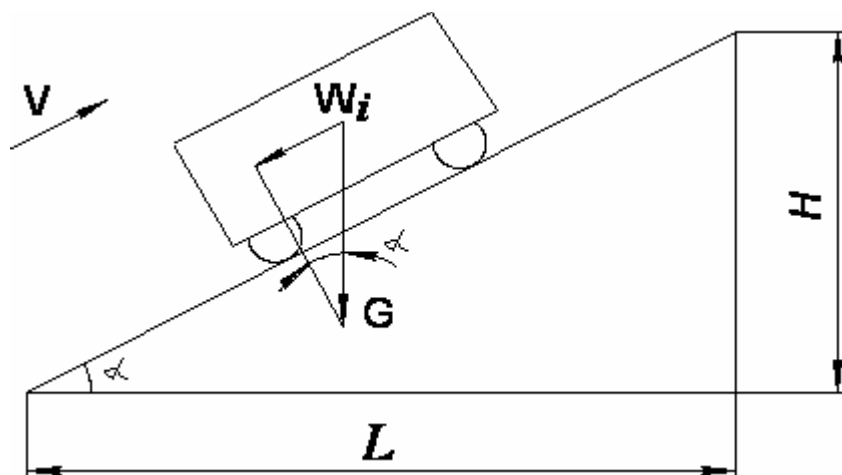


Рисунок 1.7 – Образование дополнительного сопротивления движению поезда

$$W_i = G \cdot \sin \alpha \approx G \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (1.33)$$

где  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{L} = i$ ,

где  $i$  – величина уклона в промилле, ‰;

$H$  – высота уклона, м;

$L$  – длина уклона, м.

Разделим обе части выражения (1.33) на  $mg$  и получим окончательно

$$w_i = \pm i. \quad (1.34)$$

Таким образом, дополнительное удельное сопротивление движению поезда от уклона численно равно величине этого уклона. При этом при движении поезда на подъеме оно добавляется к основному сопротивлению движения, а при движении на спуске – оно вычитается из основного сопротивления движению.

Дополнительное сопротивление движению от кривой возникает из-за появления дополнительного трения скольжения в результате: поперечного смещения колес по рельсам и набегания гребней колес на внутренние грани наружного рельса под действием центробежных сил инерции; продольного проскальзывания колес от разности расстояний, проходимых наружными и внутренними колесами одной колесной пары и т. д.

Удельное дополнительное сопротивление от кривых определяется по следующей эмпирической формуле

$$w_{KP} = \frac{700}{R_{KP}}, \quad (1.35)$$

где  $R_{KP}$  – радиус кривой, м.

Сопротивление  $w_{KP}$  учитывается за счет добавления его значения к дополнительному сопротивлению движению поезда от уклонов  $w_i$ .

Дополнительное сопротивление движению поезда от низких температур и ветра учитывается с помощью специальных коэффициентов, приведенных в ПТР.

Примечание.

Так как дополнительное сопротивление движению поезда на различных участках пути имеет произвольное значение, то зависимость полного удельного сопротивления от скорости движения поезда не определяется.

## ***1.4 Тормозная сила поезда при механическом торможении***

### **1.4.1 Образование тормозной силы**

Силы сопротивления движению – нерегулируемые силы. Поэтому для снижения скорости движения поезда или для его полной остановки необходимо иметь на поезде устройства, позволяющие при необходимости включать и регулировать дополнительную силу сопротивления движению, называемую в этом случае, тормозной. Эта сила создается с помощью механического прижатия тормозных колодок к бандажам движущихся колес подвижного состава, и потому такое торможение называется механическим.

Рассмотрим образование механической силы торможения (рисунок 1.8). При срабатывании автотормозов происходит прижатие тормозной колодки к бандажу колеса с помощью специальной рычажной передачи с силой нажатия  $K$ .



Под действием силы нажатия  $K$  возникает сила трения  $B$  между колодкой и колесом

$$B = 1000 \cdot K \cdot \varphi_K, \quad (1.36)$$

где  $\varphi_K$  – коэффициент трения между колесом и колодкой.

Сила  $B$  вызывает реакцию буксы – силу  $B'$ . При чем  $B = B'$ .

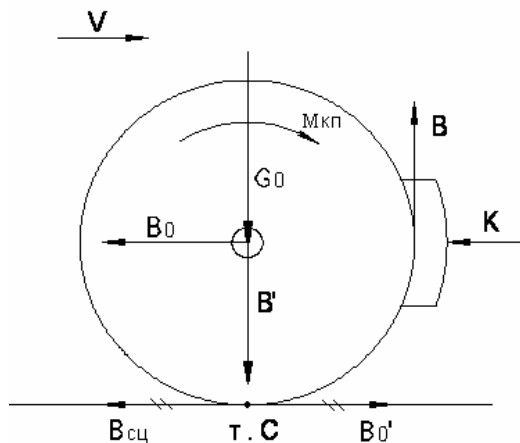


Рисунок 1.8 – Образование тормозной силы поезда

Заменяем пару сил  $B B'$  равнодействующей парой сил  $B_0 B'_0$ :  $B = B' = B_0 = B'_0$ . При этом сила  $B'_0$  приложена в точке касания колеса с рельсом (точка «С») к рельсу. При нормальном сцеплении (без юза) в точке «С» возникает равная ей по величине сила  $B_{сц}$ , но противоположная ей по направлению и приложенная к колесу, т. е.  $B_{сц} = B'_0$ . Силы  $B_{сц}$  и  $B'_0$  взаимно уравновешивают друг друга, остается только одна сила  $B_0$ , которая приложена к оси колесной пары и направлена в сторону противоположную движению поезда – она и является тормозной силой  $B_T$

$$B_T = B_0.$$

При механическом торможении нормальное движение (без юза) аналогично режиму тяги возможно только при соблюдении условия

$$B_{Ti} \leq B_{сц.МАХ}. \quad (1.37)$$

Но  $B_{сц.МАХ}$  аналогично режиму тяги равно

$$B_{сц.МАХ} = 1000 \cdot G_0 \cdot \psi_K. \quad (1.38)$$

Из (1.37) и (1.38) получаем закон реализации нормального (без юза) процесса торможения

$$B_{Ti} \leq 1000 \cdot G_0 \cdot \psi_K, \quad (1.39)$$

т. е. тормозная сила не должна превышать максимально возможную (потенциальную) силу сцепления колеса с рельсом.

## 1.4.2 Вычисление тормозной силы

Очевидно, тормозная сила  $B_T$  поезда представляет собой сумму тормозных сил  $B_{Ti}$  всех колес поезда. Тогда из (1.36) следует

$$B_T = \sum B_{Ti} = 1000 \sum (K_i \cdot \varphi_{Ki}), \quad (1.40)$$

Перейдем к удельной тормозной силе

$$b_T = \frac{B_T}{mg} = 1000 \sum \frac{(K_i \cdot \varphi_{Ki})}{mg}. \quad (1.41)$$

Коэффициенты трения  $\varphi_{Ki}$  зависят от трех параметров: силы нажатия  $K_i$ , скорости движения  $V_i$  и материала колодок. Опытным путем установлено, что с увеличением скорости движения значения коэффициента трения колодки о колесо уменьшаются (рисунок 1.9).

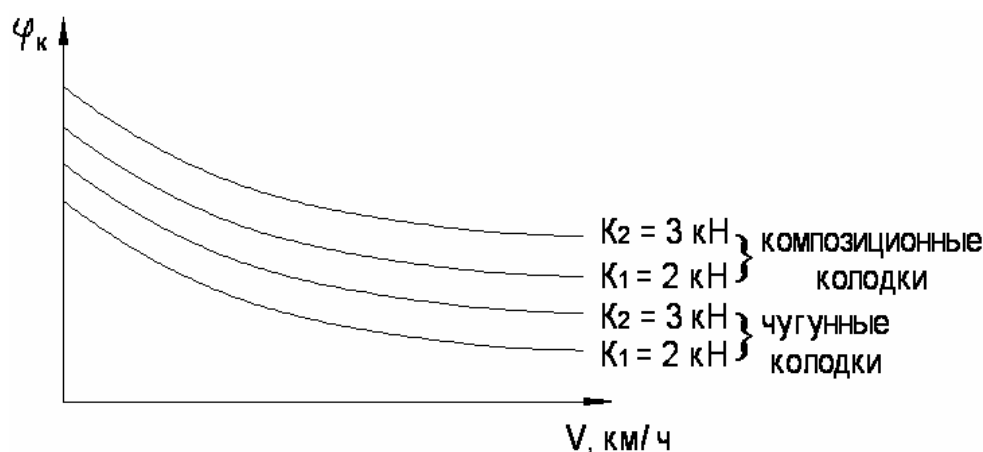


Рисунок 1.9 – Зависимости коэффициента трения от скорости поезда

Для облегчения расчетов вводятся понятия расчетных значений коэффициента трения  $\varphi_{KP}$  и силы нажатия  $K_P$ . Последний считается неизменным:  $K_P = Const$ . Чтобы при этом сохранились действительные значения тормозной силы надо, чтобы соблюдалось равенство

$$K_i \cdot \varphi_{Ki} = K_P \cdot \varphi_{KP}. \quad (1.42)$$

Откуда

$$K_P = K_i \cdot \frac{\varphi_{Ki}}{\varphi_{KP}}, \quad (1.43)$$

т. е. расчетные значения силы нажатия  $K_P$  зависят только от их действительных значений  $K$ . Формулы для перехода от действительных значений силы нажатия к расчетной  $K_P$  приведены в ПТР.

Тогда расчетный коэффициент трения  $\varphi_{KP}$  становится функцией только одной переменной – скорости движения поезда (рисунок 1.10).

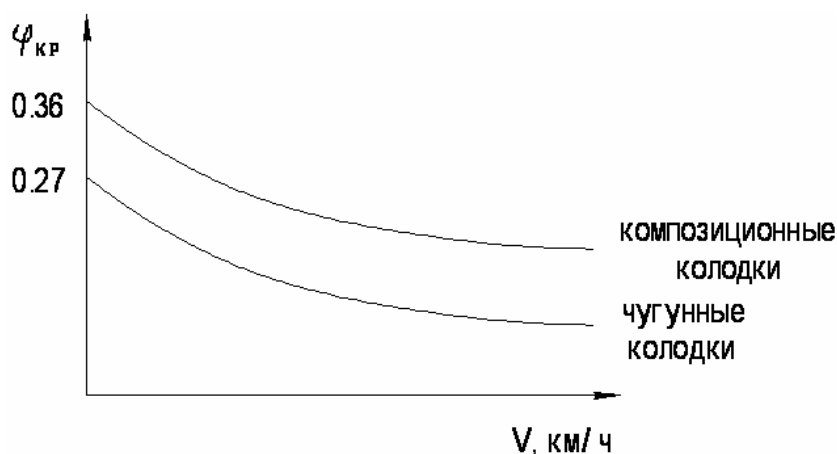


Рисунок 1.10 – Зависимости расчетного коэффициента трения от скорости движения поезда

Эмпирические формулы для определения расчетного коэффициента трения приведены в ПТР. Так

– для чугунных колодок при  $K_p = 27$  кН

$$\varphi_{кр.ч.к} = 0,27 \cdot \frac{V + 100}{5V + 100}; \quad (1.44)$$

– для композиционных колодок при  $K_p = 16$  кН

$$\varphi_{кр.к.к} = 0,36 \cdot \frac{V + 150}{2V + 150}. \quad (1.45)$$

Принятые значения  $K_p$  соответствуют средним значениям действительных сил нажатия на колодку четырехосного вагона при груженом и порожнем режимах торможения.

Используя расчетные значения  $K_p$  и  $\varphi_{кр}$ , получаем

$$b_T = 1000 \cdot \varphi_{кр} \sum \frac{K_{Pi}}{mg}. \quad (1.46)$$

Обозначим

$$\mathcal{G} = \sum \frac{K_{Pi}}{mg}, \quad (1.47)$$

где  $\mathcal{G}$  – расчетный тормозной коэффициент поезда.

Тогда из (1.46) и (1.47) получаем окончательно

$$b_T = 1000 \cdot \varphi_{кр} \cdot \mathcal{G}. \quad (1.48)$$

Таким образом, удельная тормозная сила поезда определяется по (1.48) и также, как коэффициент трения, является функцией скорости (рисунок 1.11):

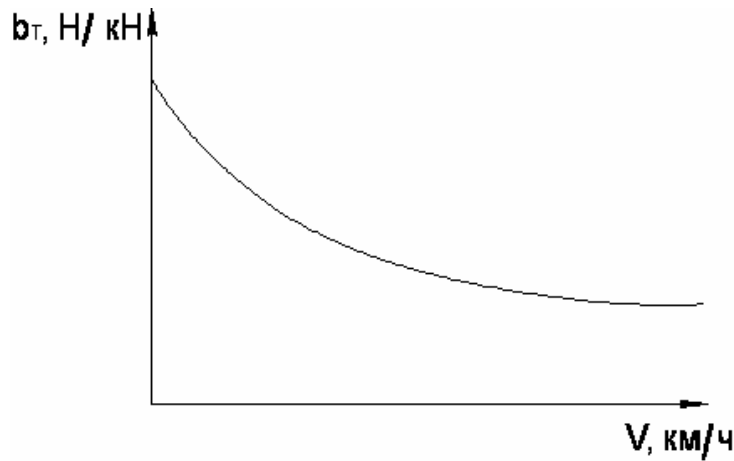


Рисунок 1.11 – Зависимость удельной тормозной силы от скорости поезда

### 1.5 Диаграмма удельных сил поезда

Диаграмма удельных сил поезда – это зависимость всех внешних удельных сил поезда от скорости его движения, построенных в одной общей системе координат (рисунок 1.12).

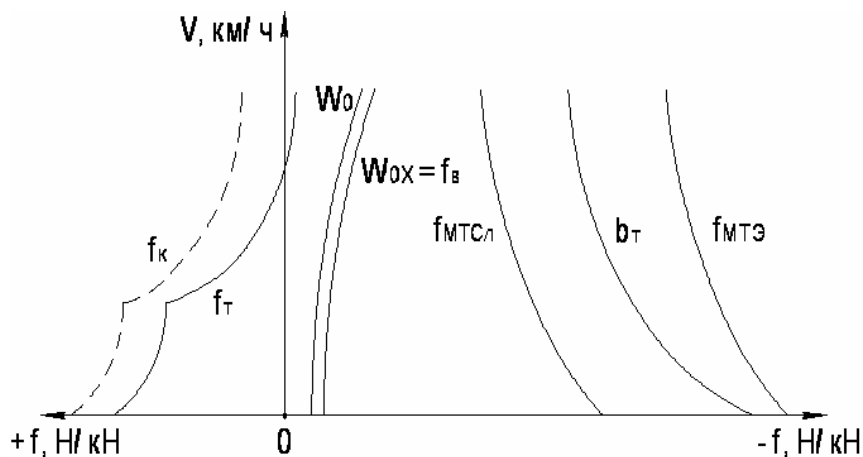


Рисунок 1.12 – Диаграмма удельных сил поезда

Имея зависимости каждой внешней удельной силы поезда от скорости его движения, можно построить диаграмму удельных равнодействующих сил поезда для всех трех возможных режимов движения поезда:

а) удельная равнодействующая сила поезда в режиме тяги

$$f_T = f_K - w_0, \quad (1.49)$$

б) удельная равнодействующая сила поезда в режиме выбега

$$f_B = -w_{0X}, \quad (1.50)$$

в) удельная равнодействующая сила поезда в режиме механического торможения:

– экстренное торможение

$$f_{MT.Э} = -b_T - w_{0X}; \quad (1.51)$$

– служебное торможение

$$f_{MT.CЛ} = -0,5 \cdot b_T - w_{0X}. \quad (1.52)$$

Примечание.

Так как дополнительное сопротивление движению поезда  $W_i$  не является функцией скорости, а зависит от профиля пути, то на диаграмме удельных сил показывается только основное сопротивление движению поезда. Дополнительное сопротивление движению поезда учитывается в тяговых расчетах специальным способом.

### 1.6 Сила инерции поезда

Сила инерции поезда – это сила, появление которой связано с кинетической энергией, накопленной поездом и всеми его вращающимися частями при движении. В общем случае

$$F_{и} = m \frac{dV}{dt} + \sum \left( \frac{J_i}{R_i} \frac{d\omega_i}{dt} \right), \quad (1.53)$$

где  $J_i$  – момент инерции  $i$ -ой вращающейся части поезда;

$R_i$  – радиус  $i$ -ой вращающейся части поезда;

$\omega_i$  – угловая частота вращения  $i$ -ой части поезда.

Если вынести за скобку  $m$ , перейти от  $\omega$  к  $V$  и сделать соответствующие преобразования, то получим

$$F_{и} = m \cdot \frac{(1 + \gamma)}{\xi} \cdot \frac{dV}{dt}, \quad (1.54)$$

где  $(1 + \gamma)$  – коэффициент инерции вращающихся частей поезда;

$\xi$  – переводный коэффициент, зависящий от использованной размерности физических величин.

Для электровозов

$$(1 + \gamma) = 1,15 \dots 1,3. \quad (1.55)$$

Для вагонов поездов принимаются следующие значения коэффициента инерции вращающихся масс:

– грузовых груженых – 1,03...1,04;

– грузовых порожних – 1,07...1,08;

– пассажирских – 1,06.

### 1.7 Физическая модель поезда

Движение поезда – это сложный механический процесс, на ход которого влияет множество физических факторов, которые заранее рассчитать трудно

или даже невозможно. К таким факторам относятся: изменение погоды, особенности груза, квалификация машиниста, техническое состояние пути и подвижного состава и т. д. Поэтому в тяговых расчетах невозможно обойтись без ряда упрощений, которые позволяют сложные в действительности процессы выразить в виде достаточно простых для практических расчетов схем и зависимостей.

В тяговых расчетах основные упрощения заключаются в том, что движение поезда рассматривается как движение единого целого вдоль пути, пренебрегая колебаниями подвижного состава в вертикальном и поперечном направлениях, изменениями расстояния между вагонами и т.д. Эти упрощения позволяют рассматривать движение поезда как поступательное движение твердого тела вдоль пути с одной степенью свободы. Тогда физическая модель поезда может быть представлена как МАТЕРИАЛЬНАЯ ТОЧКА, в которой сосредоточена масса всего поезда и к которой приложена равнодействующая всех сил поезда. Расположение центра тяжести поезда принято в середине длины поезда. Из теоретической механики известно, что движение материальной точки с одной степенью свободы описывается дифференциальным уравнением первого порядка, определим его.

## 2 Математическая модель поезда

### 2.1 Основное уравнение движения поезда

Рассмотрим режим тяги, в котором сила тяги  $F_K$  преодолевает силу сопротивления движению  $W_K$  и силу инерции  $F_{II}$

$$F_K = W_K + F_{II}. \quad (2.1)$$

С учетом (1.1) и (1.54) из (2.1) получаем

$$\xi \cdot F = (1 + \gamma) \cdot m \cdot \frac{dV}{dt} \quad (2.2)$$

– это и есть основное уравнение движения поезда (1-я форма записи).

Учитывая, что  $V = \frac{dS}{dt}$ , подставим в правую часть уравнения (2.2) вместо

$dt$  дробь  $\frac{dS}{V}$  и получим 2-ю форму записи основного уравнения движения поезда

$$\xi \cdot F = (1 + \gamma) \cdot m \cdot V \cdot \frac{dV}{dS}. \quad (2.3)$$

Если уравнения (2.2) и (2.3) разделить на  $mg$ , считать  $(1 + \gamma) = 1,06$ , а за размерность используемых в этих уравнениях физических величин принять: путь  $S$ (км), время  $t$ (ч) и скорость  $V$ (км/ч), то  $\xi = 120$ , тогда в удельных силах получаем следующую окончательную форму записи основного уравнения движения поезда:

$$\frac{dV}{dt} = 120 \cdot f, \quad (2.4)$$

или

$$V \cdot \frac{dV}{dS} = 120 \cdot f. \quad (2.5)$$

Из (2.4) следует, что если:

$f > 0$  – имеет место движение поезда с ускорением,

$f < 0$  – имеет место движение поезда с замедлением,

$f = 0$  – имеет место движение поезда с равномерной скоростью.

Физический смысл основного уравнения движения поезда заключается в том, что это уравнение связывает ускорение поезда ( $\frac{dV}{dt} = a$ , км/ч<sup>2</sup>) с удельной

равнодействующей силой поезда. На каждую единицу удельной равнодействующей силы скорость поезда возрастает (если  $f = +1$  Н/кН) или уменьшается (если  $f = -1$  Н/кН) на 120 км/ч за один час (или на 2 км/ч за одну минуту). В каждом конкретном случае (т. е. при движении поезда с заданным значением

скорости  $V$  по пути с заданным профилем  $w_i$ ) ускорение поезда может быть определено из диаграммы удельных равнодействующих сил поезда (рисунок 2.1). Например, при скорости  $V_i = 60$  км/ч:

– в режиме тяги удельная равнодействующая сила  $f_T$  уменьшилась с 6 Н/кН до 4 Н/кН, тогда замедление поезда составит  $4 \frac{\text{км/ч}}{\text{мин}}$ ;

– в режиме выбега  $f_B$  уменьшилась с -4 Н/кН до -2 Н/кН, тогда ускорение поезда составит  $4 \frac{\text{км/ч}}{\text{мин}}$ ;

– в режиме служебного торможения  $f_{\text{МТСл}}$  увеличилась с -4 Н/кН до -8 Н/кН, тогда замедление поезда составит  $8 \frac{\text{км/ч}}{\text{мин}}$ .

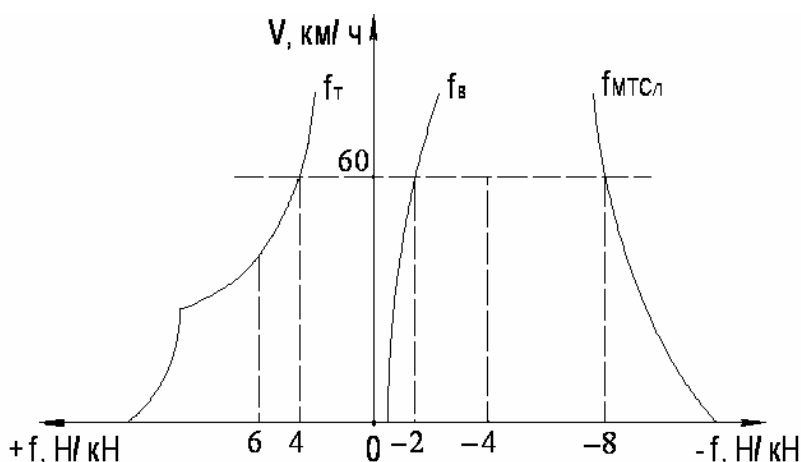


Рисунок 2.1 – Диаграмма удельных равнодействующих сил поезда

В связи со спецификой работы ж.д. транспорта при решении основного уравнения движения поезда за независимую переменную принимают путь  $S$ . Тогда графическое решение уравнений (2.4) и (2.5) имеет вид зависимостей  $V(S)$  и  $t(S)$ , которые принято называть «кривыми движения поезда» (рисунок 2.2):

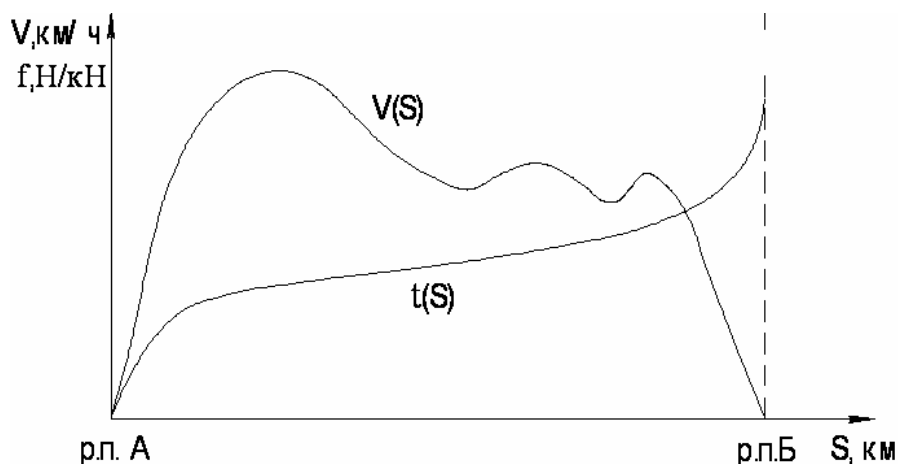


Рисунок 2.2 – Зависимости скорости и времени движения поезда от пути



## 2.2 Математическая модель процесса движения поезда

Математической моделью какого-либо физического процесса называют систему математических соотношений параметров изучаемого процесса в пределах выбранной степени приближения с учетом принятых начальных условий и допустимых ограничений его параметров. Таким образом, система математических соотношений представляет собой допущения, дифференциальные уравнения, начальные условия и ограничения.

Согласно рассмотренной выше физической модели движения поезда, его основного уравнения и физической природы действующих на него сил можно составить следующие математические соотношения, полностью характеризующие процесс движения поезда и являющиеся его математической моделью:

а) допущения:

– поезд является материальной точкой;

– напряжения на ТЭД и диаметры бандажей колесных пар локомотива неизменны и равны своим номинальным значениям;

б) уравнения:

$$\frac{dV}{dt} = 120 \cdot f, \quad (2.6)$$

$$V \cdot \frac{dV}{dS} = 120 \cdot f, \quad (2.7)$$

где  $f$  – удельная равнодействующая сила поезда, Н/кН.

В общем случае

$$f = f_K - w_K - k_T \cdot b_T, \quad (2.8)$$

где  $k_T$  – коэффициент реализации тормозной силы.

В режиме тяги

$$f = f_T - w_i, \quad (2.9)$$

где

$$f_T = f_K - w_0. \quad (2.10)$$

В режиме выбега

$$f = f_B - w_i, \quad (2.11)$$

где

$$f_B = -w_{0X}. \quad (2.12)$$

В режиме механического торможения:

– экстренного

$$f = f_{MTЭ} - w_i, \quad (2.13)$$

где  $f_{MTЭ} = -b_T - w_{0X}$ ,

$k_T = 1$ ;

– служебного

$$f = f_{MТСЛ} - w_i, \quad (2.15)$$

где  $f_{MТСЛ} = -0,5 \cdot b_T - w_{0X}$ ,

$k_T = 0,5$ .

в) начальные условия

$$t_0, V_0, S_0. \quad (2.17)$$

г) ограничения

$$V_i = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{ДОП} \\ V_{КЛ} \\ V_{КВ} \end{array} \right\}, \quad (2.18)$$

$$\tau_i \leq \tau_{ДОП}, \quad (2.19)$$

где  $V_i, V_{ДОП}$  – текущее и допустимое значения скоростей движения поезда;  
 $V_{КЛ}, V_{КВ}$  – конструкционные скорости локомотива и вагонов соответственно;  
 $\tau_i, \tau_{ДОП}$  – текущая и допустимая температура перегрева ТЭД, °С.

Итак, соотношения а), б), в) и г) – это и есть математическая модель процесса движения поезда.

### 2.3 Блок-схема математической модели процесса движения поезда

Порядок выполнения вычислительных процедур и взаимосвязи между ними в соответствии с только что рассмотренной математической моделью процесса движения поезда можно проиллюстрировать с помощью блок-схемы.

Блок-схема – это условное графическое изображение математической модели какого-либо физического процесса, представленное в виде отдельных блоков, внутри которых записываются те математические преобразования, которые претерпевают физические величины, поступающие на их входы. Блок-схема позволяет наглядно представить себе сразу весь математический аппарат изучаемого физического процесса и все взаимосвязи между его элементами.

Порядок построения блок-схемы (рисунок 2.3):

- начинать с блока основных уравнений,
- постепенно разворачивать схему справа налево, расставляя обозначения входных физических величин согласно математической модели.

Из структурной семы видно, что с помощью определенных комбинаций работы ключей К1, К2 и К3 могут быть получены любые из четырех возможных режимов ведения поезда по участку:

а) режим тяги:

К1 – замкнут;

К2 – разомкнут (находится в нейтральном положении);

К3 – замкнут в положение «Т»;

при этом реализуются уравнения (2.9), (2.10), (1.5) и (1.27);

б) режим выбега:

К1 – разомкнут;

К2 – разомкнут (находится в нейтральном положении);

К3 – замкнут в положение «В-Т»;

при этом реализуются уравнения (2.11), (2.12) и (1.28);

в) режим экстренного торможения:

К1 – разомкнут;

К2 – замкнут в положение «ТЭ»;

К3 – замкнут в положение «В-Т»;

здесь реализуются уравнения (2.13), (2.14), (1.46) и (1.28);

г) режим служебного торможения:

К1 – разомкнут;

К2 – замкнут в положение «ТС»;

К3 – замкнут в положение «В-Т»;

здесь реализуются уравнения (2.15), (2.16), (1.46) и (1.28).

Во всех случаях дополнительное сопротивление движению поезда  $w_i$  от уклонов и кривых учитывается с помощью элемента «профиль пути», где в табличной форме представлены значения  $w_i$  в функции от значений километровых отметок пути  $w_i(S)$ .

## 2.4 Интегрирование основного уравнения движения поезда

Итак, основное уравнение движения поезда представляет собой нелинейное уравнение первого порядка, так как равнодействующая всех внешних сил поезда является нелинейной функцией скорости  $f(V)$ :

$$\frac{dV}{dt} = 120 \cdot f, \quad (2.20)$$

$$V \cdot \frac{dV}{dS} = 120 \cdot f. \quad (2.21)$$

Поэтому решение уравнений (2.20) и (2.21) представляет собой неопределенный интеграл с нелинейной подынтегральной функцией  $f(V)$ :

$$t = \frac{1}{120} \cdot \int \frac{dV}{f(V)}, \quad (2.22)$$

$$S = \frac{1}{120} \cdot \int V \cdot \frac{dV}{f(V)}. \quad (2.23)$$

Вычисление такого интеграла, как известно, дает бесчисленное множество решений. Чтобы найти частное решение, задаются начальными условиями и линеаризуют подынтегральную функцию.

Линеаризация характеристики  $f(V)$  производится методом малых отклонений (метод конечных приращений), который заключается в следующем (рисунок 2.4): на небольшом интервале  $\Delta V_i$  изменения скорости от  $V_i$  до  $V_{i+1}$  ( $\Delta V_i = V_{i+1} - V_i$ ) считается, что скорость изменяется линейно, а удельная равнодействующая сила неизменна и равна своему среднему значению в этом интервале скоростей

$$f_{i.sp} = \frac{f_i + f_{i+1}}{2}. \quad (2.24)$$



Аналогично

$$V_{i.c.p} = \frac{V_i + V_{i+1}}{2}. \quad (2.25)$$

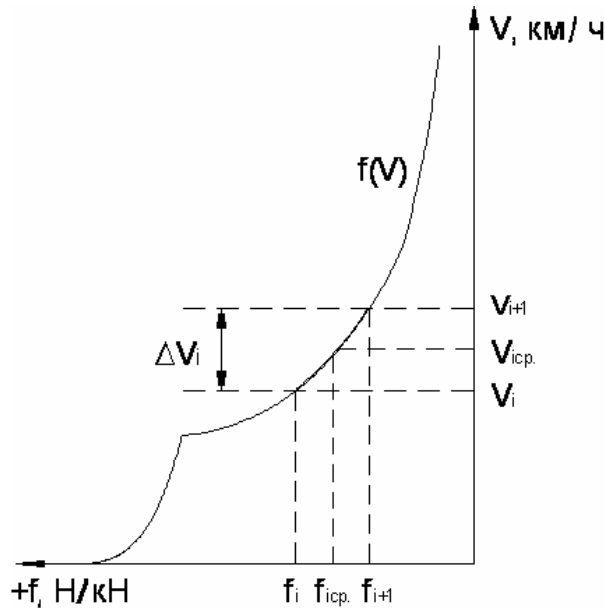


Рисунок 2.4 – Линеаризация зависимости  $f(V)$

Тогда из (2.20) и (2.21), переходя к приращениям, можно записать:

$$\Delta t_i = \frac{\Delta V_i}{120 \cdot f_{c.p.i}}, \quad (2.26)$$

$$\Delta S_i = V_{c.p.i} \cdot \frac{\Delta V_i}{120 \cdot f_{c.p.i}}. \quad (2.27)$$

Теперь уравнения (2.22) и (2.23) легко интегрируются:

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t_i = t_i + \frac{\Delta V_i}{120 \cdot f_{c.p.i}}, \quad (2.28)$$

$$S_{i+1} = S_i + \Delta S_i = S_i + \frac{\Delta V_i \cdot V_{c.p.i}}{120 \cdot f_{c.p.i}} = S_i + V_{c.p.i} \cdot \Delta t_i. \quad (2.29)$$

Очевидно, чем больше взято интервалов  $\Delta V_i$ , т. е. чем больше ломаная линия приближается к заданной кривой  $f(V)$ , тем выше точность расчетов.

## 3 Тяговые расчеты

### 3.1 Постановка задачи

Исходными данными при производстве тяговых расчетов являются:

- серия локомотива и его основные технические данные (масса, конструктивная скорость, расчетная сила тяги, осевая формула и т. д.);
- поездоучасток с профилем пути, расположением станций и длиной их станционных путей;
- состав поезда и его тормозные средства;
- допустимые скорости движения поезда по участку;
- алгоритм производства тяговых расчетов (или по минимальному перегонному времени хода, или по минимуму расхода энергоресурсов на тягу поездов и т. п.).

Непосредственной задачей тяговых расчетов является определение расчетной массы состава, определение всех трех координат движения поезда по участку (скорости, пути и времени), а также расхода энергоресурсов на тягу поездов и температуры перегрева тяговых двигателей.

### 3.2 Определение расчетной массы состава

#### 3.2.1 Постановка задачи

Обычно наибольшая масса грузового состава является наивыгоднейшей по производительности железных дорог. Поэтому расчет массы состава ведут из условия полного использования мощности и тяговых свойств локомотива. При этом различают следующие виды масс (весовых норм) грузовых составов:

а) критическая масса состава ( $m_{c,кр}$ ) – это масса состава, определяемая по мощности локомотива, работающего в расчетном режиме, т. е. с расчетной скоростью и расчетной силой тяги, при движении поезда на руководящем подъеме с равномерной скоростью. Критическая масса состава определяется для каждого поездоучастка, каждого железнодорожного направления проверяется опытными поездками и устанавливается приказом начальника дороги;

б) унифицированная (графиковая) масса состава ( $m_{c,ун}$ ) – это масса состава, принимаемая на железнодорожном направлении для транзитных поездов и проходящая по силе тяги для большинства поездоучастков данного направления, устанавливается ОАО «РЖД». На тех участках, где унифицированная масса состава не проходит по силе тяги, применяют двойную тягу или подталкивание;

в) параллельная масса состава ( $m_{c,п}$ ) – это масса отправительских и порожних маршрутов, следующих без переформирования в пределах направления. Устанавливается министром путей сообщения.

Как следует из рассмотренных определений, рассчитывается только критическая масса состава.

### 3.2.2 Расчет критической массы состава

Расчет производится при условии движения поезда с равномерной скоростью на расчетном подъеме в расчетном режиме работы локомотива, т. е. при работе локомотива с расчетной силой тяги  $F_{кр}$  и расчетной скоростью  $V_p$ .

Расчетным подъемом на участке считается один из наиболее крутых и наиболее затяжных подъемов, при движении поезда по которому устанавливается равномерная скорость, равная расчетной скорости локомотива. Таким образом, расчетный подъем не может быть преодолен с использованием кинетической энергии движения поезда.

Согласно отраслевому стандарту СТНЦ–01–95 для железнодорожных линий с колеей 1520 мм устанавливаются следующие значения руководящих подъемов:

- а) до 9‰ – на особо грузонапряженных линиях;
- б) до 12‰ – на линиях 1-ой категории;
- в) до 15‰ – на линиях 2-ой категории;
- г) до 20‰ – на линиях 3-ой категории;
- д) до 30‰ – на линиях 4-ой категории.

Итак, при равномерной скорости движения поезда равнодействующая сила поезда равна нулю

$$F(V_p) = 0. \quad (3.1)$$

Или

$$F_K(V_p) = W_K(V_p) = W'_K(V_p) + W''_K(V_p). \quad (3.2)$$

Откуда

$$F_{кр} = (w'_0 + i_p) \cdot m_{л} \cdot g + (w''_0 + i_p) \cdot m_{с.кр} \cdot g. \quad (3.3)$$

И окончательно

$$m_{с.кр} = \frac{\frac{F_{кр}}{g} - (w'_0 + i_p) \cdot m_{л}}{w''_0 + i_p}. \quad (3.4)$$

Примечание.

Полученное значение критической массы состава округляется с точностью до 50 т. Кроме того, при определении  $w'_0$  и  $w''_0$  целесообразно сразу же определять их не только для расчетной скорости, но и для всего спектра скоростей от 0 до  $V_{доп}$ , и затем сразу заносить в заранее подготовленную таблицу 3.1 удельных сил поезда (графы 1, 2, 3, 4, 5), которая будет заполняться потом по мере производства тяговых расчетов.

Таблица 3.1 – Удельные силы поезда

$V$ , км/ч	$w'_0$ , Н/кН	$w''_{04}$ , Н/кН	$w''_{08}$ , Н/кН	$w''_0$ , Н/кН	$\varphi_{KP}$	$b_T$ , Н/кН	$t_{II}$ , с	$S_{II}$ , м	$w'_{0X}$ , Н/кН	$w_{0X}$ , Н/кН	$f_{ЭКСТ}$ , Н/кН	$w_0$ , Н/кН	$F_K$ , кН	$f_K$ , Н/кН	$f_T$ , Н/кН	$f_{СЛ.ТОРМ}$ , Н/кН
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0																
10																
20																
30																
40																
46,7																
50																
60																
70																
80																
90																
100																



### 3.2.3 Проверка критической массы состава

Существуют следующие проверки критической массы состава:

а) по преодолению подъема большего, чем расчетный;

б) по троганию с места производится для отдельных пунктов с наибольшим подъемом по условию

$$m_{C.KP} \leq m_{C.TP}, \quad (3.5)$$

где  $m_{C.TP}$  – масса состава, который может быть взят с места.

$$m_{C.TP} = \frac{F_{K.TP}}{g} \cdot (w_{TP} + w_D) - m_L, \quad (3.6)$$

где  $F_{K.TP}$  – сила тяги локомотива при трогании с места, определяемая по тяговой характеристике локомотива, кН;

$w_{TP}$  – удельное основное сопротивление движению поезда при трогании с места, определяемое по выражениям (1.29) и (1.30), Н/кН;

$w_D$  – удельное дополнительное сопротивление движению поезда от уклона и кривой на месте трогания, Н/кН;

в) по длине поезда  $L_{II}$ , которая не должна превышать полезной длины приемо-отправочных путей  $L_{ПОП}$  на станциях участка обращения данного поезда, т. е.

$$L_{II} \leq L_{ПОП}, \quad (3.7)$$

где

$$L_{II} = L_C + N_L \cdot L_L + 10, \quad (3.8)$$

где  $L_{II}, N_L$  – длина и число локомотивов в поезде соответственно, м;

10 – допуск на установку поезда, м;

$L_C$  – длина состава, м.

$$L_C = \sum N_{B.i} \cdot L_{B.i}, \quad (3.9)$$

где  $L_{B.i}, N_{B.i}$  – длина и число однотипных вагонов в составе поезда соответственно, м.

$$N_{B.i} = \frac{m_C \cdot \alpha_i}{m_{B.i}}, \quad (3.10)$$

где  $m_{B.i}$  – средняя масса однотипной группы вагонов, т;

$\alpha_i$  – доля состава (по массе), приходящаяся на группу однотипных вагонов;

г) по крутизне подъема, на котором разрешается трогание с места с критической массой состава;

д) по нагреву тяговых двигателей;

е) по мощности системы энергоснабжения.

### 3.3 Построение диаграммы основных удельных результирующих сил поезда

#### 3.3.1 Режим тяги

Равнодействующая сила поезда в режиме тяги:

$$f_T = f_K - w_0, \quad (3.11)$$

где

$$f_K = \frac{F_K}{mg}. \quad (3.12)$$

$F_K$  берется из тяговой характеристики локомотива,

$$w_0 = \frac{w_0' \cdot m_L + w_0'' \cdot m_C}{m_L + m_C}. \quad (3.13)$$

Результаты расчетов заносятся в графы 13, 14, 15, 16 таблицы 3.1.

#### 3.3.2 Режим выбега

Здесь

$$f_B = -w_{0X}, \quad (3.14)$$

где

$$w_{0X} = \frac{w_X \cdot m_L + w_0'' \cdot m_C}{m_L + m_C}. \quad (3.15)$$

Для всех локомотивов на звеньевом пути

$$w_X = 2,4 + 0,0111 \cdot V + 0,000035 \cdot V^2. \quad (3.16)$$

Заполняются графы 10 и 11 таблицы 3.1.

#### 3.3.3 Режим экстренного торможения

Равнодействующая сила поезда в режиме экстренного торможения

$$f_{ЭТ} = -w_{0X} - b_T, \quad (3.17)$$

где

$$b_T = 1000 \cdot V \cdot \varphi_{KP}. \quad (3.18)$$

Для чугунных колодок

$$\varphi_{KP} = \frac{0,27 \cdot (V + 100)}{5 \cdot V + 100}. \quad (3.19)$$

Заполняются графы 6, 7 и 12 таблицы 3.1.

### 3.3.4 Режим регулировочного и служебного торможения

Здесь

$$f_{CT} = -w_{0X} - 0,5 \cdot b_T. \quad (3.20)$$

Результаты расчетов заносятся в графу 17 таблицы 3.1.

По данным таблицы 3.1 строится диаграмма основных удельных равнодействующих сил поезда для всех рассмотренных режимов работы локомотива. Пример диаграммы приведен на рисунке 1.12.

## 3.4 Решение тормозной задачи

### 3.4.1 Постановка задачи

Процесс движения поезда в режиме механического торможения определяется следующими четырьмя взаимосвязанными физическими факторами:

- а) тормозными средствами поезда –  $b_T = 1000 \cdot V \cdot \varphi_{KP}$ , Н/кН;
- б) профилем пути –  $w_K = w_0 \pm i$ , Н/кН;
- в) скоростью начала торможения –  $V_{HT}$ , км/ч;
- г) величиной тормозного пути –  $S_T$ , м.

Отсюда следует, что в общем случае возможны четыре группы тормозных задач по определению одной из четырех неизвестных величин по оставшимся известным трем величинам. Учитывая, что обычно задаются профилем пути и тормозными средствами поезда, то на практике встречаются два следующих вида тормозных задач:

- определение тормозного пути по известному профилю пути, заданным тормозным средством поезда и скорости начала торможения;
- определение допустимой скорости начала торможения по известному профилю пути, заданным тормозным средством поезда и заданному тормозному пути.

Первая задача встречается при регулировочном и служебном торможении, а вторая – при экстренном торможении.

### 3.4.2 Решение тормозной задачи при регулировочном торможении

Здесь построение зависимости  $V(S)$  производится методом МПС, а за равнодействующую силу поезда принимается –  $f_{MT.СЛ} = -w_{0X} - 0,5 \cdot b_T$  (рисунок 3.1).

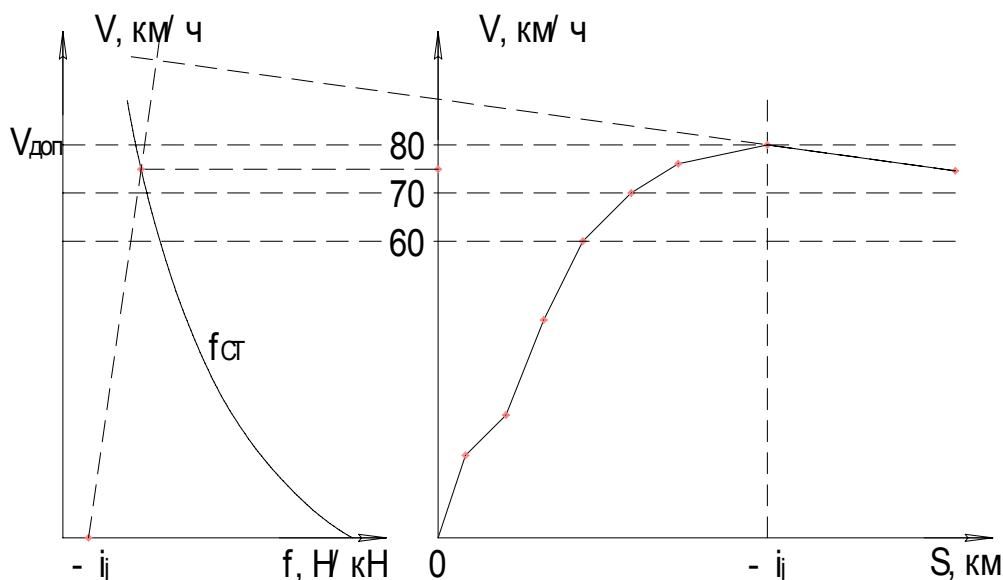


Рисунок 3.1 – Решение тормозной задачи при регулировочном торможении

### 3.4.3 Решение тормозной задачи при служебном торможении

Если отсутствует точное указание места остановки поезда, то решение задачи производится точно так же, как и при регулировочном торможении, но только ведется оно до полной остановки поезда.

Если место остановки задано (например, на конкретном раздельном пункте), то графическое построение зависимости  $V(S_T)$  ведется уже справа налево, т. е. от точки заданной остановки поезда до точки пересечения (т.А) с зависимостью  $V(S)$ , идущей от начала участка (рисунок 3.2):

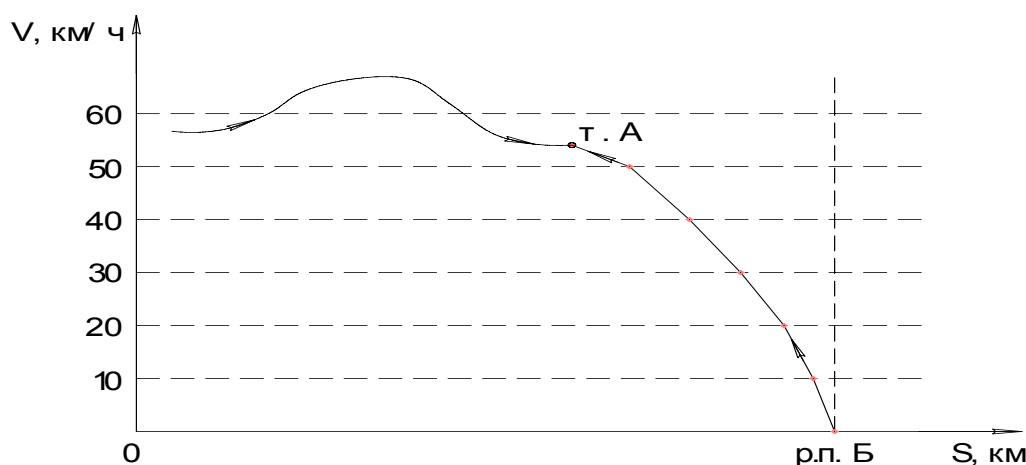


Рисунок 3.2 – Решение тормозной задачи при служебном торможении

### 3.4.4 Решение тормозной задачи при экстренном торможении

В этом случае за равнодействующую силу поезда принимается

$$f_{ЭТ} = -w_{0X} - b_T. \quad (3.21)$$

Как известно, в связи со спецификой действия автотормозов полный тормозной путь  $S_T$  имеет две составляющие

$$S_T = S_{пт} + S_{дт}, \quad (3.22)$$

где  $S_{пт}$  – тормозной путь, пройденный поездом за время подготовки тормозов к действию;

$S_{дт}$  – тормозной путь, пройденный поездом за время действия тормозов.

Подготовительный тормозной путь  $S_{пт}$  определяется по выражению

$$S_{пт} = 0,278 \cdot V_{нт} \cdot t_{пт}, \quad (3.23)$$

где  $V_{нт}$  – скорость начала торможения, км/ч;

$t_{пт}$  – время подготовки тормозов к действию, с.

$$t_{пт} = \frac{a - d \cdot i}{b_T}, \quad (3.24)$$

где  $a, d$  – коэффициенты, значения которых для грузовых поездов определяются числом осей, а для пассажирских – наличием электропневматических тормозов;

$i$  – значение уклона на тормозном пути, ‰ (при спуске значение берется со знаком «минус»).

Действительный тормозной путь  $S_{дт}$  определяется путем решения основных уравнений движения поезда графическим методом МПС.

Тогда решение тормозной задачи при экстренном торможении может быть получено графическим способом: если из начала заданного тормозного пути  $S_T$  по выражению (3.23) построить зависимость  $S_{пт}(V_{нт})$ , а из конца тормозного – зависимость  $V_{нт}(S_{дт})$ , то точка их пересечения и даст значение допустимой скорости начала торможения –  $V_{нт.доп}$  (рисунок 3.3).

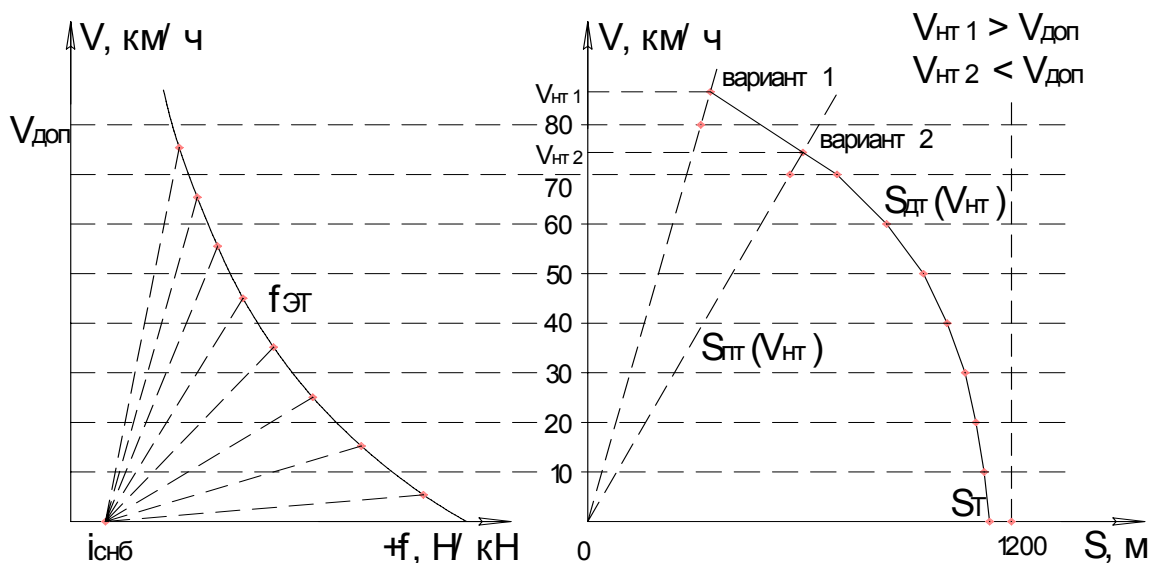


Рисунок 3.3 – Решение тормозной задачи при экстренном торможении

Примечание.

Если окажется, что  $V_{нт.доп} > V_{доп}$ , то это означает, что ограничение по скорости начала торможения на данном элементе профиля пути отсутствует. Обычно тормозную задачу при экстренном торможении решают на самом крутом спуске поездоучастка.

### 3.5 Построение кривых движения поезда

#### 3.5.1 Способы решения основного уравнения движения поезда

Процесс построения кривых движения поезда заключается в решении основного уравнения движения поезда (2.4). Различают три способа решения основного уравнения движения поезда: аналитический, графический и с помощью ПЭВМ.

#### 3.5.2 Аналитический метод решения основного уравнения движения поезда

При линеаризации нелинейной зависимости  $f(V)$  методом малых отклонений, когда за независимую переменную взята скорость  $V$ , имеем следующие условия линеаризации:

$$\Delta V_i = V_{i+1} - V_i = Const;$$

$$V_{cp.i} = \frac{V_{i+1} + V_i}{2};$$

$$f_{cp.i} = \frac{f_{i+1} + f_i}{2},$$

где  $f_{cp.i} = Const$  в интервале  $\Delta V_i$ .

Технология вычислительного процесса зависимостей  $V(S)$  и  $t(S)$  следующая: задаемся значением  $\Delta V_i$  и по формулам (2.27), (2.29) вычисляем  $\Delta S_i$  и  $S_{i+1}$ , а по (2.26) и (2.28) –  $\Delta t_i$  и  $t_{i+1}$ , результаты заносим в таблицу 3.2; на следующем шаге задаемся  $\Delta V_{i+1}$  и вычисляем  $\Delta S_{i+1}, S_{i+2}, \Delta t_{i+1}, t_{i+2}$ ; соответственно на  $n$ -ом шаге  $\Delta V_{i+n}$  вычисляем  $\Delta S_{i+n}, S_{i+(n+1)}, \Delta t_{i+n}, t_{i+(n+1)}$  и далее аналогично.

Таблица 3.2 – Результаты тяговых расчетов

$V$ , км/ч	$\Delta S$ , км	$S$ , км	$\Delta t$ , мин	$t$ , мин
1	2	3	4	5
0-10	0,4	0,4	0,3	0,3
10-20	0,5	0,9	0,25	0,55
20-30	0,7	1,6	0,2	0,75
30-40	0,3	1,9	0,15	0,9

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5
40-50	0,5	2,4	0,1	1
50-60	0,6	3,0	0,1	1,1
60-70	1,1	4,1	0,18	1,28
70-80	0,9	5	0,15	1,43

Порядок построения графических зависимостей  $V(S)$  и  $t(S)$  по полученным данным расчетов показан на рисунке 3.4.

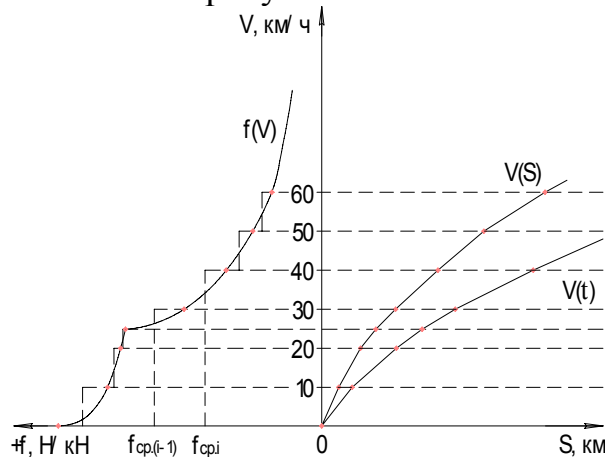


Рисунок 3.4 – К аналитическому методу вычисления основного уравнения движения

### 3.5.3 Графический метод вычисления основного уравнения движения поезда

#### 3.5.3.1 Построение зависимости $V(S)$ методом МПС

Линеаризация зависимости  $f(V)$  точно такая же, как и при аналитическом методе, но при построении точек 1,2,3,4 и т. д. для зависимости  $V(S)$  и точек 1',2',3',4' и т. д. для зависимости  $t(S)$  применяется графический способ, который называется методом МПС. Данный метод приведен в ПТР и до появления ПЭВМ являлся основным в практике производства тяговых расчетов.

Пусть дана зависимость  $f(V)$  и зависимость  $V(S)$  до точки Б ( $V_i, S_i$ ) (рисунок 3.5)

Рассмотрим интервал  $\Delta V_i = V_{i+1} - V_i$  (при этом считаем, что профиль пути в этом интервале площадка, т. е.  $i = 0$ ). На зависимости  $f(V)$  в интервале  $\Delta V_i$  отметим точку А ( $f_{cp,i}; V_{cp,i}$ ) и проведем луч АО, к которому через точку Б проведем перпендикуляр ДД'.





Примечание: внутри интервала  $\Delta V_i$  не должно находиться ни перелома кривой  $f(V)$ , ни перелома профиля пути.

### 3.5.3.2 Построение зависимости $t(S)$ методом МПС

Выполняется по предварительно построенной зависимости  $V(S)$ .

Пусть дана зависимость  $V(S)$  (кривая 1) и соответствующая ей зависимость  $t(S)$  (кривая 2) (рисунок 3.6).

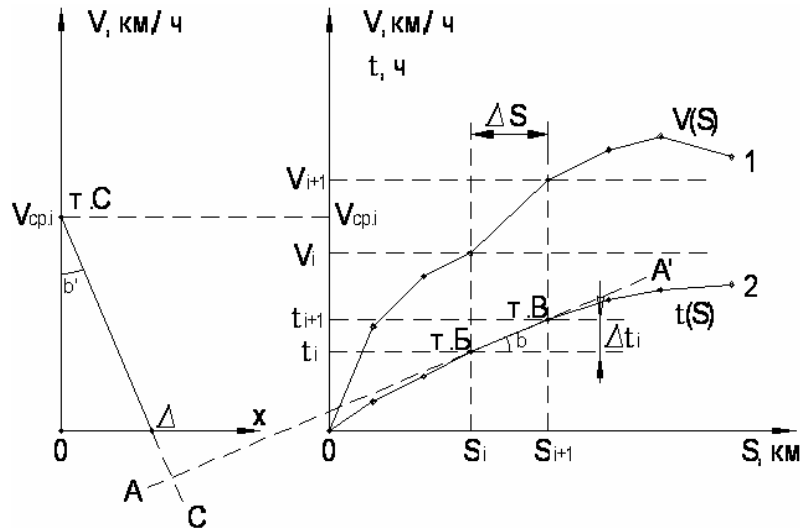


Рисунок 3.6 – Построение зависимости  $t(S)$  методом МПС

Рассмотрим произвольный интервал  $\Delta V_i = V_{i+1} - V_i$ , которому соответствует интервал  $\Delta S_i = S_{i+1} - S_i$ . Определим, при каком условии отрезок БВ луча  $AA'$  в интервале  $\Delta S_i$  является зависимостью  $t(S)$ , т. е. его проекция на ось “ $t$ ” даст интервал  $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ .

Обозначим угол  $\beta$ . Тогда

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta t_i \cdot m_t}{\Delta S_i \cdot m_s}. \quad (3.4)$$

Возьмем произвольную прямоугольную систему координат  $V(x)$ , которая сопараллельна системе  $V(S)$ . На оси  $V$  отложим отрезок  $O - V_{cp,i}$  (точка  $C$ ) и проведем из точки  $C$  луч  $CC'$ , перпендикулярный лучу  $AA'$ . Луч  $CC'$  отсекает на оси  $x$  отрезок  $\Delta$ .

Обозначим угол  $\beta'$ . Тогда

$$\operatorname{tg} \beta' = \frac{\Delta}{V_{cp,i} \cdot m_V}. \quad (3.5)$$

По построению углы  $\beta$  и  $\beta'$  – это углы с взаимно перпендикулярными сторонами, т. е.  $\beta = \beta'$ . Тогда из равенства их тангенсов и (2.27) следует

$$\Delta = \frac{m_v \cdot m_t}{m_s} \quad (3.6)$$

Значит, если отрезок  $\Delta$  выбрать по условию (3.6), то перпендикуляр к лучу, проведенному через точки  $V_{cp.i}$  и  $\Delta$ , и даст в интервале  $\Delta S_i$  зависимость  $t(S)$ .

Отсюда следует такой порядок построения зависимости  $t(S)$ :

- берется предварительно построенная зависимость  $V(S)$  с теми же интервалами  $\Delta V_i$  и  $\Delta S_i$ ;
- готовится шаблон, представляющий собой семейство прямоугольных треугольников, имеющих один общий катет, равный по величине  $\Delta$ , а гипотенузы этих треугольников образованы лучами, соединяющими точку  $\Delta$  со всеми точками  $V_{cp.i}$ , находящимися на втором катете;
- шаблон  $V_{cp.i}(\Delta)$  располагается так, чтобы его ось  $V_{cp.i}$  была параллельна оси скорости зависимости  $V(S)$ ;
- перпендикуляры, проведенные к этим лучам, и дают зависимость  $t(S)$  в соответствующих интервалах  $\Delta S_i$ .

Пример.

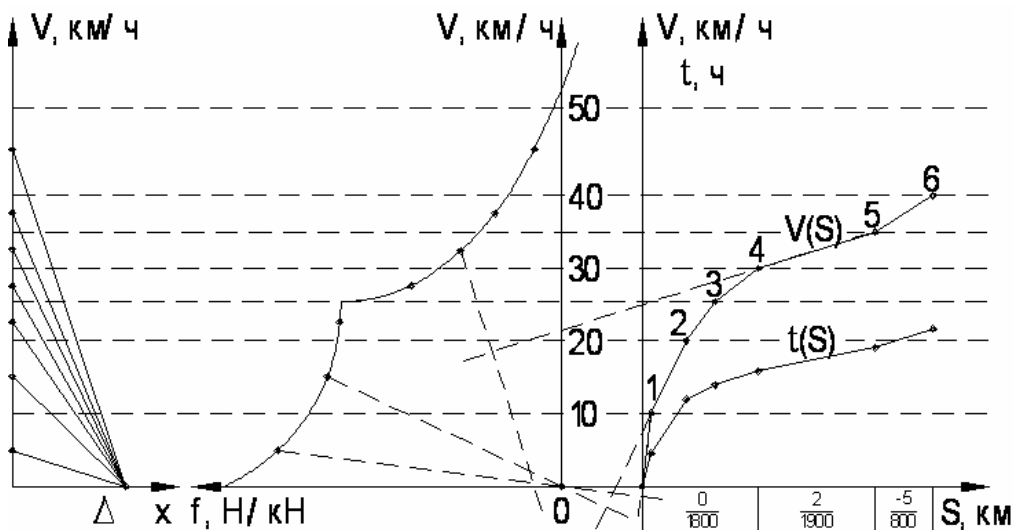


Рисунок 3.7 – Пример построений кривых движения поезда методом МПС

Примечание.

Согласно рассмотренной технологии проведения вычислительных процедур, при решении основных уравнений движения поезда аналитическим и графическим методами, основная часть блок-схемы математической модели движения поезда может быть представлена так, как на рисунке (3.8).

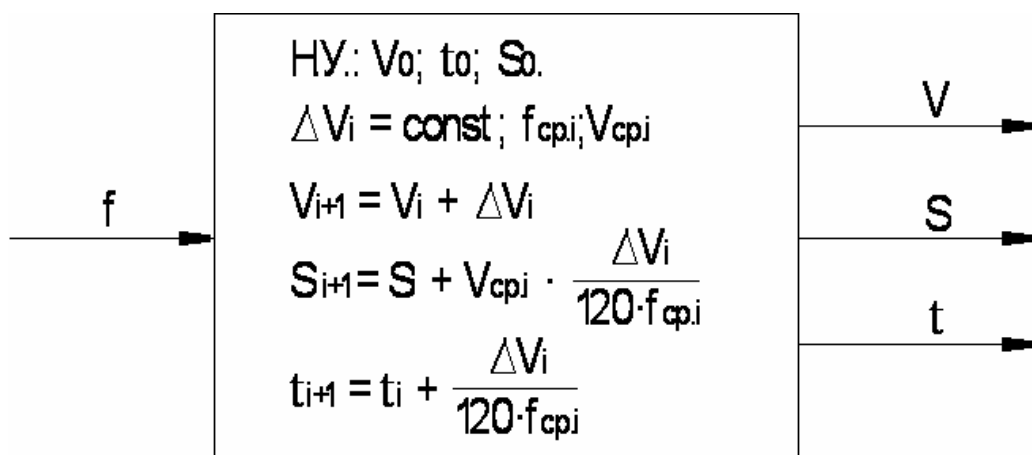


Рисунок 3.8 – Блок-схема математической модели движения поезда

### 3.6 Оценка полученных результатов

После построения кривых движения определяют время хода по участку, а также техническую и участковую скорости, которые относятся к качественным показателям работы железной дороги. Анализ результатов заключается в выявлении режимов ведения поезда, обеспечивающих получение наименьшего времени хода и режимов, обеспечивающих наименьший расход электроэнергии при разгоне, движении с установившейся скоростью, замедлении на элементах с ограничением скорости и замедлении до полной остановки поезда на промежуточной станции или станции назначения. На основе оценки полученных результатов тяговых расчетов делается вывод о возможности получения наименьшего расхода электроэнергии при соблюдении полученного времени хода.

Очевидно, что для повышения пропускной способности необходимо снижать время хода по участку, а, следовательно, повышать среднюю скорость поезда. Для получения наибольшей средней скорости движения требуется наибольшая возможная результирующая сила, которая получается в тяговом режиме при работе с наибольшим тяговым усилием (с учетом ограничения силы тяги по сцеплению колес с рельсами). Движение с наибольшей возможной силой тяги до конца элемента профиля пути или до точки пути, где скорость движения достигает допустимого значения, и дальнейшее движение со скоростью, близкой к допустимой, обеспечивают наибольшую возможную скорость в конце рассматриваемого элемента профиля пути, тем самым создают условия для получения наименьшего времени хода на следующем элементе.

Следует учитывать, что уменьшение времени хода, как правило, сопровождается увеличением расхода электроэнергии или топлива, т. к. для поддержания скорости около допустимого значения чаще всего приходится чередовать режимы тяги и торможения, а режим выбега, в котором поезд расходует только собственную накопленную энергию, будет использоваться значительно реже. В связи с этим экономически целесообразно снижать время хода за счет

увеличения допустимой скорости движения и снижения количества и времени стоянок поезда.

### ***3.7 Использование результатов тяговых расчетов***

Результаты тяговых расчетов используются:

- при разработке режимных карт ведения поезда;
- при составлении графика оборота локомотивов;
- для окончательного уточнения параметров подвижного состава, масс поездов, режимов и эксплуатационных показателей их работы;
- при изысканиях и проектировании железных дорог;
- при решении задач, связанных с повышением эффективности работы железнодорожного транспорта.

Например, при составлении режимных карт используют зависимости потребления поездами тока или мощности от пути или времени и расхода энергии на их движение. Времена хода и скорости движения поезда по перегонам используются при составлении графика оборота локомотивов. Ток тяговых электродвигателей и время потребления необходимы при расчете их нагрева в тяжелых режимах работы. Кривые потребления поездами тока и энергии на электрифицированных линиях требуются для расчета системы электроснабжения дороги.

### **Список использованных источников**

1. Правила тяговых расчетов для поездной работы (ПТР). – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
2. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги: Учебник для вузов ж.-д. трансп.– 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Транспорт, 1983 – 328 с.
3. Гребенюк П.Т. Тяговые расчеты. Справочник. – М.: Транспорт, 1987 – 256 с.
4. Подвижной состав и основы тяги поездов /Под ред. С.И. Осипова. – М.: Транспорт, 1990. – 336 с.
5. Подвижной состав и тяга поездов /Под ред. В.В. Деева и Н.А. Фуфрянского. – М.: Транспорт, 1979. – 367 с.

Эдуард Иосифович Бегагоин  
Николай Олегович Фролов  
Илья Николаевич Пампурин

## **Тяга поездов**

Методическое пособие к лекционному курсу по дисциплине  
«Тяга поездов» для студентов всех форм обучения специальностей 190701  
«Управление процессами перевозок», 280102 «Безопасность технологических  
процессов и производств» и 280202 «Инженерная защита окружающей среды»

II часть

Редактор С.В. Пилюгина

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, УрГУПС

Редакционно-издательский отдел

Подписано в печать

Бумага писчая №1  
Тираж 200

Формат 60x80 1/16  
Цена договорная

Усл.п.л.2,9 Уч.-изд.л.2,3  
Заказ