

Особенностью тяговых расчетов является то, что расчетные значения сил, действующих на поезд и влияющих на характер движения его по рельсовой колее, не всегда могут быть определены теоретически — из-за сложности учета различных влияющих факторов. Поэтому тяговые расчеты в значительной степени базируются на исходных данных (характеристиках), полученных на основе обработки показателей натурных испытаний различного типа подвижного состава и обобщения практического опыта его эксплуатации. Все основные нормативы и формулы, используемые в тяговом расчете, приведены в Правилах тяговых расчетов для поездной работы (ПТР) [28]¹.

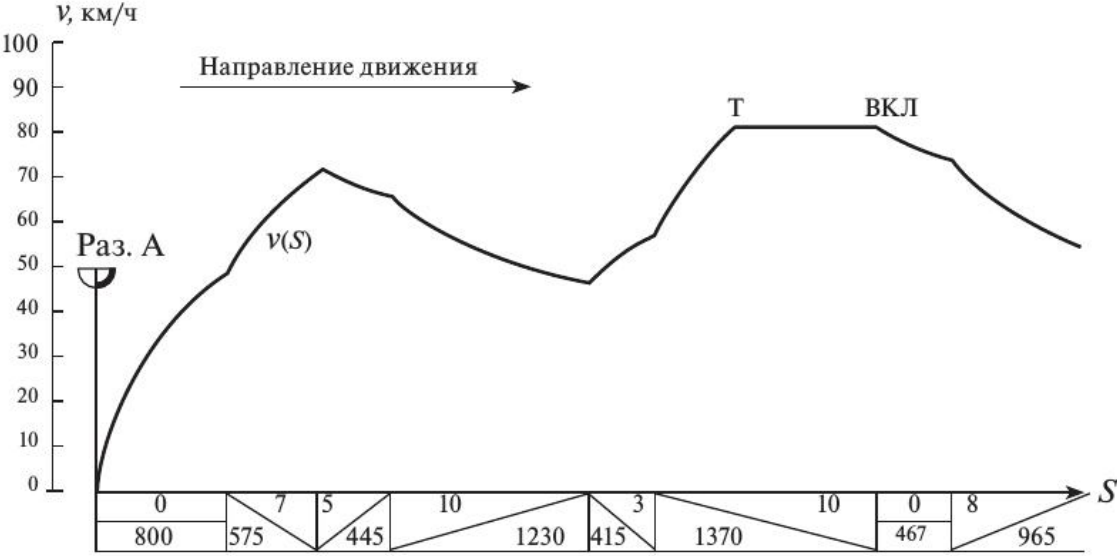


Рис. 4.1. Кривая скорости движения поезда на участке пути

Важнейшей зависимостью, определяющей количественные показатели движения поезда, является так называемая кривая скорости $v(S)$ на рис. 4.1. Продольный профиль участка железнодорожной линии на рис. 4.1 задан уклонами элементов [в «тысячных», т. е. в метрах подъема (спуска) на километр пути] и длинами элементов (в метрах). Зависимость $v(S)$ рассчитана от точки начала движения поезда на разъезде А. Располагая зависимостью $v(S)$ можно установить значение скорости поезда в любой точке S на пути его следования. На этой зависимости указывают места (точки) изменения режима работы локомотива (или поезда в целом): тяга, выбег (холостой ход), торможение. В большинстве задач тяговых расчетов кривую $v(S)$ «привязывают» к середине длины поезда.

4.2. Силы, действующие на поезд

Общее представление о силах, действующих на поезд. В тяговых расчетах учитывают лишь те составляющие внешних сил, приложенных к поезду, направление которых совпадает с траекторией движения поезда, поскольку именно они оказывают влияние на продольное перемещение поезда по рельсовой колее. Такими силами являются: сила тяги F , обуславливающая перемещение поезда в требуемом направлении; силы

¹ Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 г. №867р.

сопротивления движению поезда W , возникающие в результате действия ряда факторов, в том числе вследствие взаимодействия поезда с окружающей средой; тормозная сила B , обеспечивающая поддержание скорости поезда на требуемом (допустимом) уровне или ее снижение до необходимой величины (вплоть до остановки поезда). Сила тяги и тормозная сила — это управляемые силы, поскольку находятся в ведении машиниста (он ими управляет). Силы сопротивления движению — это неуправляемые силы, поскольку зависят не только от скорости поезда, но и от характеристик подвижного состава и от параметров плана и продольного профиля пути, по которому в данный момент времени движется поезд, а также от погодных условий окружающей среды.

В зависимости от того, какие управляемые силы в данный момент времени действуют на поезд, различают следующие режимы движения поезда:

- *режим тяги* — тяговые электродвигатели (ТЭД) локомотива включены, на поезд действуют силы F и W ;
- *режим выбега (холостого хода)* — ТЭД выключены, на поезд действуют силы W ;
- *режим торможения* — ТЭД выключены и включены тормоза, на поезд действуют силы W и B .

Для внешних сил, приложенных к поезду, можно принять следующее правило знаков: направленные в сторону перемещения поезда — положительные, в противоположную сторону — отрицательные (рис. 4.2). При таком правиле знаков сила тяги положительна, а тормозная сила отрицательна. Силы сопротивления движению тоже отрицательны, однако здесь существует исключение: сила сопротивления от уклона пути при движении поезда на спуск становится положительной, т. к. способствует перемещению поезда. Тогда спуски следует считать положительными уклонами, а подъемы — отрицательными.



Рис. 4.2. Правило знаков

Существует и другое правило знаков, при котором сопротивление принимают положительным, когда оно направлено против движения поезда. При таком правиле знаков *подъемы положительны*, а *спуски — отрицательны*. Именно это правило знаков принято в тяговых расчетах.

Характер движения поезда зависит от знака равнодействующей силы R . Если равнодействующая положительна ($R > 0$) — движение поезда ускоренное, при $R < 0$ — замедленное, когда $R = 0$ поезд движется равномерно.

Внутренние продольно-динамические силы (ПДС), возникающие в поезде (на сцепках между вагонами, между отдельными частями вагонов, в рамах локомотива

и вагонов и др.), практически не влияют на условия и характер поступательного движения поезда по рельсовой колее и поэтому данные силы в тяговых расчетах обычно не учитывают. ПДС, зависящие и от режима движения поезда, могут ограничивать критическую массу состава.

Различают полные и удельные силы. Силы, отнесенные к поезду в целом или к какой-то единице подвижного состава (вагону, группе вагонов), принято называть *полными*; их измеряют в ньютонах (Н) или килоньютонах (кН). Полные силы обозначают заглавными буквами. Силы, отнесенные к единице веса поезда, называют *удельными*. Их измеряют в Н/кН (вес поезда измеряют в килоньютонах, поскольку массу поезда измеряют в тоннах). Удельные силы принято обозначать соответствующими строчными буквами:

$$\begin{aligned} \text{удельная сила тяги } f &= \frac{F}{(n_{\text{л}}P + Q)g}; \\ \text{удельное сопротивление движению } w &= \frac{W}{(n_{\text{л}}P + Q)g}; \\ \text{удельная тормозная сила } b &= \frac{B}{(n_{\text{л}}P + Q)g}; \\ \text{удельная равнодействующая сила } r &= \frac{R}{(n_{\text{л}}P + Q)g}, \end{aligned}$$

где $n_{\text{л}}$ — число однотипных локомотивов в поезде; P — масса локомотива, т; Q — масса брутто состава вагонов, т; g — ускорение свободного падения, м/с².

4.3. Сила тяги и тяговые характеристики локомотивов

Образование силы тяги локомотива и ограничение ее по сцеплению. Общим у локомотивов различных видов тяги является процесс образования (реализации) силы тяги и ее ограничение по условиям сцепления колес локомотива с рельсами.

Электровозы и магистральные тепловозы имеют индивидуальный привод — каждая движущая ось локомотива приводится в движение персональным (отдельным) электрическим двигателем, названным *тяговый*. Сила тяги локомотива образуется вследствие взаимодействия тяговых электродвигателей с рельсами. Схема такого взаимодействия применительно к одному тяговому двигателю (одной движущей оси) представлена на рис. 4.3, где p_0 — масса локомотива, приходящаяся на одну ось.

Вал двигателя находится в постоянном зацеплении через зубчатую передачу (одноступенчатый редуктор) с движущей осью локомотива. Малая шестерня на валу двигателя имеет радиус r_1 , а большая

шестерня на движущей оси — радиус r_2 . Отношение $\alpha = \frac{r_2}{r_1} > 1$ называют *передаточным отношением* (*передаточным числом*). В результате взаимодействия магнитного потока, создаваемого обмоткой возбуждения главных полюсов, и тока, протекающего по обмотке якоря, создается вращающий момент M на валу тягового электродвигателя, а на ось колесной пары через редуктор передается значительно больший вращающий момент $M' = M \mu \eta_{\text{пер}}$ (где $\eta_{\text{пер}}$ — коэффициент полезного действия зубчатой передачи). Момент M' можно представить в виде пары сил (F_1 и F_2), действующих на плече

$$\frac{D}{2}, \text{ т. е. } F_1 = F_2 = \frac{M'}{D} \text{ (здесь } D \text{ — диаметр колеса локомотива по кругу катания)}.$$

Сила F_1 приложена к центру колеса, а сила F_2 — к рельсу в точке К касания обода колеса и рельса. Вследствие сцепления между колесом и рельсом в точке К возникает реактивная сила F , приложенная от рельса к ободу движущего колеса. Эта сила по направлению действия противоположна силе F_2 , и, если не нарушается сцепление в точке К, равна ей по величине.

Таким образом, одна из сил пары (F_1 и F_2) — в частности сила F_2 оказалась уравновешенной силой F , а оставшаяся свободной сила F_1 приложена к центру движущего колеса. Появление этой внешней по отношению к локомотиву силы обусловлено наличием реактивной силы F , благодаря которой становится возможным перемещение локомотива и которую поэтому обычно называют силой тяги. Поскольку эта сила приложена в точке касания колеса и рельса и направлена по касательной к окружности колеса, она получила название *касательной силы тяги*.

Направление движения $\longrightarrow$

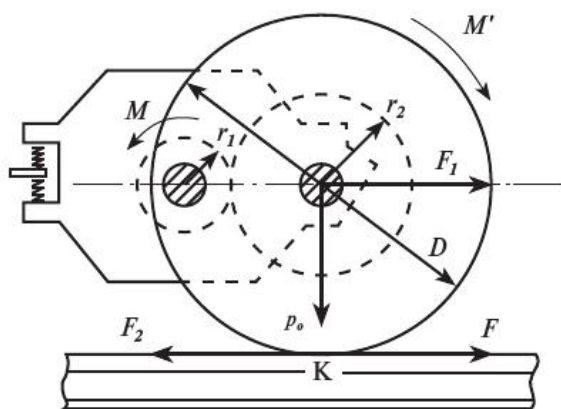


Рис. 4.3. Схема образования силы тяги локомотива

На рис. 4.3 для простоты показано только одно колесо на оси колесной пары. Символы F_1 , F_2 и F обозначают суммарную силу, приложенную к обоим колесам одной движущей оси.

Для локомотива в целом касательную силу тяги определяют как сумму касательных сил, приложенных ко всем колесам локомотива. Полная касательная сила тяги локомотива $F_k = mF_1$, где m — число тяговых электродвигателей. Касательная сила тяги учитывает потери мощности локомотива во всем процессе передачи энергии, она равна, Н:

$$F_k = F_t - P_g \Delta w'_x,$$

где F_t — сила тяги, Н, условно перенесенная к обоим движущимся колесам в предположении отсутствия потерь мощности в движущем и передаточных механизмах локомотива, ее называют *электромеханической* для электровозов и *индикаторной* для тепловозов; $\Delta w'_x$ — удельное сопротивление, Н/кН, от трения в движущем и передаточном механизмах.

По мере увеличения вращающего момента, приложенного к колесным парам локомотива, возрастает и сила тяги, однако лишь до тех пор, пока она не достигнет предельной силы сцепления колес локомотива с рельсами. При дальнейшем увеличении вращающего момента ТЭД локомотива сцепление между колесами и рельсами нарушается и колеса начинают пробуксовывать¹. Наибольшая касательная сила тяги, которая может быть реализована по условиям сцепления колес локомотива с рельсами, не должна превышать силу сцепления с рельсами всех колесных пар локомотива, т. е. должно соблюдаться условие:

¹ Из-за нарушения (уменьшения) сцепления между колесом и рельсом возникает буксование, что вредно как для рельсов, так и для самих колесных пар (из-за неравномерного истирания).