

РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА (МИИТ)

**Одобрено кафедрой
«Тяговый
подвижной состав»**

Локомотивы, электрификация, тяга поездов

Задание на курсовую работу
с методическими указаниями

Москва – 2022

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

По учебному плану студенты обучающиеся по специальности «Эксплуатация железных дорог» на 3 курсе изучают дисциплину «Тяга поездов». Для лучшего усвоения дисциплины студенты должны выполнить курсовую работу.

Курсовую работу необходимо выполнять, осмысленно применяя расчетные формулы и тщательно продумывая выводы и результаты. Совершенно недопустимо механическое применение формул и выполнение по ним расчетов. Методические указания, которые приводятся ниже, не избавляют студента от необходимости глубоко и внимательно разобраться в рассматриваемых вопросах, используя рекомендуемую литературу. При несоблюдении этого студент не приобретет необходимых знаний и окажется неподготовленным к экзамену по дисциплине.

При выполнении контрольной работы необходимо придерживаться следующих положений.

1. Работа должна быть выполнена в тетради, составленной из стандартных листов писчей бумаги (размером 210x297 мм) с обязательным оставлением полей для замечаний рецензента; на титульном листе необходимо указать дисциплину, курс, фамилию, инициалы и шифр студента, а также год издания задания на контрольную работу, в соответствии с которым она выполняется.

2. Работа должна быть написана аккуратно, разборчивым почерком, без сокращения слов.

3. Исходные данные должны быть обязательно приведены в начале работы.

4. Расчеты нужно сопровождать пояснениями. Расчетные формулы приводятся сначала в общем виде с применением принятых буквенных обозначений, после чего следует подставить в формулу числовые значения величин и проставить результат.

Необходимо указать, что представляют собой величины, входящие в формулу, обязательно проставляя для именованных величин их единицы измерения.

5. При выборе расчетных величин и параметров, использовании таблиц, формул, справочных материалов нужно ссылаться на источники; использованную литературу следует привести в конце работы.

6. Материал следует излагать с соблюдением принятой в технической литературе терминологии.

7. Точность вычислений до 1% является достаточной при расчетах, поэтому при использовании ПЭВМ результаты следует округлять.

8. Графическую часть работы выполняют на масштабной координатной (миллиметровой) бумаге.

При изображении графических зависимостей следует:

- а) на каждом графике иметь нулевую абсциссу и нулевую ординату;
- б) графические зависимости вычерчивать аккуратно, остро заточенным карандашом;
- в) оси координат выделить более толстой линией;
- г) на осях координат проставлять буквенные обозначения откладываемых величин и их единицы измерения;
- д) на осях координат нанести числовые шкалы в соответствии с принятыми масштабами изображения величин.

При построении графических зависимостей на миллиметровой бумаге начало координат следует выбирать в точке пересечения жирных линий; круглые значения числовых шкал на осях координат весьма желательно ставить против более жирных линий сетки.

9. Таблицы, диаграммы и графики необходимо вкладывать в тетрадь так же, как и страницы с текстом, в корешок тетради, не поворачивая их на 90°, чтобы удобно было пользоваться (не следует приклеивать графики и таблицы к полям страниц!). Вкладывать графики и таблицы в тетрадь нужно сразу же за той страницей, где есть касающиеся их пояснения.

10. Страницы работы, иллюстрации, таблицы и графики должны быть пронумерованы. Таблицы должны иметь названия, иллюстрации и графики – подрисуночные подписи.

11. Работу следует подписать и указать дату ее выполнения.

12. Готовая работа должна быть представлена в университет не позднее срока, установленного учебным планом.

После получения прорецензированной работы нужно независимо от того, зачтена она или не зачтена, исправить все ошибки и сделать требуемые дополнения. Если работа не зачтена, следует в кратчайший срок выполнить требования рецензента и выслать исправленную работу вместе с рецензией в университет для повторной проверки. При этом не следует переписывать целиком работу или отдельные ее разделы; нельзя также производить исправления по написанному тексту; все исправления и дополнения должны быть сделаны на отдельных листах и вклеены или вшиты в соответствующие места работы. Стирать и зачеркивать замечания рецензента запрещается. Выполнив какое-либо исправление и получив новый числовой результат, следует, если это требуется, внести соответствующие поправки в дальнейшие расчеты.

Курсовые работы, в которых не соблюдены изложенные выше положения, а также работы, выполненные студентом не по своему варианту, не зачитываются.

Зачтенную работу с исправлениями и дополнениями, сделанными по требованию рецензента, следует сохранить, так как ее необходимо представить при ее защите.

Выполнение курсовой работы способствует лучшему усвоению учебного материала, в частности, методов определения массы состава, расчетов по построению диаграмм удельных равнодействующих сил, анализа по этим диаграммам условий движения поезда, способов определения скорости и времени движения поезда по участку.

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

В курсовой работе студент должен:

1. Описать конструкцию заданного локомотива.
2. Провести анализ профиля пути, установить крутизну расчетного подъема и определить самый крутой спуск.
3. Определить массу состава по выбранному расчетному подъему.
4. Выполнить проверку массы состава по длине приемоотправочных путей отдельных пунктов заданного участка.
5. Рассчитать таблицу и построить диаграмму удельных равнодействующих сил.
6. Определить максимально допустимую скорость движения на наиболее крутом спуске участка при заданных тормозных средствах поезда. Определить максимально допустимую скорость движения на прочих уклонах, используя номограммы, приведенные в приложении.
7. Рассчитать скорость и время хода поезда по участку. Построить кривые скорости $v = f(s)$ и времени $t = f(s)$ используя аналитические способы расчета.
8. Рассчитать время хода поезда по участку приближенным способом. Определить допустимость использования приближенных способов расчета.

Исходные данные выбираются студентом по последней цифре учебного шифра (таблица 1), а профиль участка – по предпоследней цифре шифра (таблица 2). При цифрах 0, 2, 4, 6, 8 в направлении от ст. *А* к ст. *К*, а при цифрах 1, 3, 5, 7, 9 – от ст. *К* к ст. *А*, при этом знаки уклонов сменить на обратные. Эти данные, а также расчетные параметры заданного локомотива (таблица 3) **обязательно приводятся** в начале работы. Кроме того, студент должен вычертить упрощенную схему заданного тепловоза или электровоза, а также его тяговую характеристику. Схемы локомотивов приведены на рисунке 1.

Таблица 1 – Исходные данные

	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Локомотив	Электровоз ВЛ10	Электровоз 2ЭС5К	Тепловоз 2М62	Тепловоз 2ТЭ116	Тепловоз 3ТЭ10М	Тепловоз 2ТЭ10М	Электровоз ВЛ80Р	Тепловоз 2ТЭ10М	Электровоз ВЛ11	Электровоз ВЛ8
Состав поезда из четырехосных вагонов на подшипниках качения										
Масса вагона брутто, q_4 , т	88									
Длина приемо- отправочных путей $l_{\text{пост}}$, м	1250	1250	850	1250	1550	1550	1050	1250	1550	850
Тормозные колодки	Чугунные					Композиционные				

Таблица 2 – Профили пути к заданию на курсовую работу (принимается профиль, номер которого соответствует предпоследней цифре шифра)

Вариант	Станции	Номер элемента	Крутизна уклона, ‰	Длина элемента, м
0 и 1	Ст. А	1	-2,5	1100
		2	-7	3400
		3	-9,0	1000
		4	0,0	1600
		5	+12,5	2850
		6	+8,5	1500
		7	+10,0	6800
	ст. К	8	+1,5	1600
2 и 3	Ст. А	1	-1,5	1800
		2	-6	2800
		3	-9	8000
		4	0,0	1600
		5	+9,0	2000
		6	+7,0	6000
		7	0,0	2400
		8	+6,0	1500
	ст. К	9	+1,5	1700
4 и 5	Ст. А	1	0,0	1100
		2	-6,0	2000
		3	0,0	1500
		4	+12,0	2500
		5	+9,0	8000
		6	+7,0	1800
		7	-7,0	5300
		8	-9,0	1000
		9	0,0	2000
	ст. К	10	+1,0	1700
6 и 7	Ст. А	1	0,0	1800
		2	-3,0	1500
		3	-7,0	9400
		4	-9,0	1250
		5	0,0	800
		6	+2,5	1200
		7	+10,0	3000
		8	+8,0	8400
		9	+2,0	1000
	ст. К	10	0,0	1800
8 и 9	Ст. А	1	0,0	1800
		2	-1,0	800

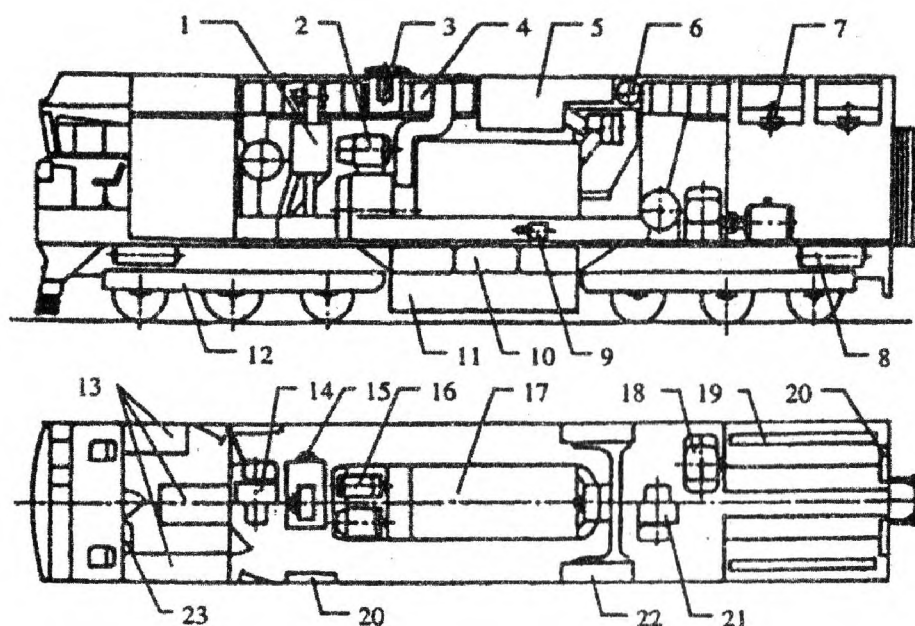
Вариант	Станции	Номер элемента	Крутизна уклона, ‰	Длина элемента, м
	ст. К	3	-4,0	1000
		4	0,0	1400
		5	-9,0	9500
		6	-10,5	1500
		7	+1,0	900
		8	+10,0	1000
		9	+8,0	8300
		10	+2,0	2000

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Точность вычислений при выполнении расчетов должна в соответствии с Правилами тяговых расчетов для поездной работы (ПТР) [7] приниматься:

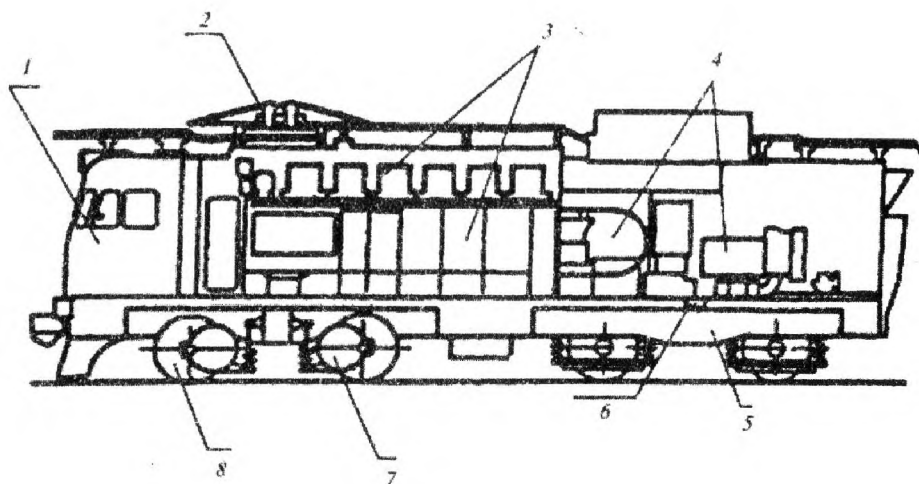
- а) для масс составов (грузовых) с округлением до 50 т;
- б) для сил, действующих на поезд (силы тяги, сопротивления, тормозные) с округлением до 50 Н;
- в) для крутизны уклонов при измерении в тысячных (промилле, ‰) – с одним знаком после запятой;
- г) для удельных сил при измерении в Н/кН – с двумя знаками после запятой;
- д) для расстояний при измерении в метрах (для элементов профиля) и в километрах (для перегонов) – с одним знаком после запятой;
- е) для скоростей при измерении в км/ч – с одним знаком после запятой;
- ж) для перегонных времен хода – расчетное до 0,1 мин, для графика движения поездов с округлением до 1 мин.

1. В первом разделе курсовой работы необходимо привести схему заданного Вам локомотива по примеру (рисунок 1 или рисунок 2) и кратко описать принцип его действия и компоновку оборудования в кузове локомотива.



1 — выпрямитель; 2 — стартер-генератор; 3 — вентилятор кузова; 4 — фильтр воздушный; 5 — глушитель; 6 — бак водяной; 7 — мотор-вентилятор холодильника; 8 — главный резервуар; 9 — агрегат масло прокачивающий; 10 — аккумуляторная батарея; 11 — топливный бак; 12 — тележка; 13 — высоковольтная камера; 14 — вентилятор тяговых электродвигателей; 15 — блок кремниевых выпрямителей; 16 — возбудитель; 17 — дизель-генератор; 18 — мотор-компрессор; 19 — секции холодильника; 20 — песочный бункер; 21 — вентилятор тяговых электродвигателей; 22 — воздухоочиститель дизеля; 23 — шкаф для одежды

Рисунок 1 — Схематическое устройство тепловоза



1 — кабина; 2 — токоприемник; 3 — электрические аппараты; 4 — вспомогательные машины; 5 — рама тележки; 6 — опора кузова; 7 — тяговый двигатель; 8 — колесная пара

Рисунок 2 — Схематическое устройство электровоза

2. Расчетный подъем – это наиболее трудный для движения в данном направлении элемент профиля пути, на котором достигается расчетная скорость, соответствующая расчетной силе тяги локомотива (таблица 3). Если наиболее крутой подъем участка достаточно длинный, то он принимается за расчетный. Если же наиболее крутой подъем заданного участка имеет небольшую протяженность и ему предшествуют «легкие» элементы профиля (спуски, площадки), на которых поезд может развить высокую скорость, то такой подъем не может быть принят за расчетный, так как поезд преодолеет его за счет накопленной кинетической энергии. В этом случае за расчетный следует принять подъем меньшей крутизны, но большей протяженности, на котором может быть достигнута равномерная скорость.

Например, для профиля № 4 (таблица 2) расчетным подъемом будет элемент, имеющий крутизну $i = +9\%$ и длину $s=8000$ м, а не элемент крутизной $i = +12\%$ и длиной $s=2500$ м, так как он небольшой длины и перед ним расположены спуски, позволяющие поезду подойти к этому подъему с большой скоростью.

3. Масса состава – один из важнейших показателей работы железнодорожного транспорта. Увеличение массы состава позволяет повысить провозную способность железнодорожных линий, уменьшить расход топлива и электрической энергии, снизить себестоимость перевозок. Поэтому массу грузового состава определяют исходя из полного использования тяговых и мощностных качеств локомотива.

Для выбранного расчетного подъема массу состава в тоннах вычисляют по формуле:

$$Q = \frac{F_{кр} - (w'_0 + i_p)Pg}{(w''_0 + i_p)g}, \quad (1)$$

где $F_{кр}$ – расчетная сила тяги локомотива, Н;

P – расчетная масса локомотива, т;

w'_0 – основное удельное сопротивление локомотива, $\frac{\text{Н}}{\text{кН}}$;

w_0'' – основное удельное сопротивление состава, $\frac{\text{Н}}{\text{кН}}$;

i_p – крутизна расчетного подъема, ‰;

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

Величины w_0' и w_0'' определяют для расчетной скорости локомотива v_p .

Расчетная скорость, расчетная сила тяги, масса локомотива и другие расчетные нормативы, приведены в таблице 3.

Основное удельное сопротивление локомотива Н/кН в зависимости от скорости на режиме тяги (при движении под током) подсчитывают по формуле:

$$w_0' = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2, \quad (2)$$

Основное удельное сопротивление состава с 4-осными вагонами на роликовых подшипниках:

$$w_{04}'' = 0,7 + \frac{3 + 0,1v + 0,0025v^2}{q_{04}}, \quad (3)$$

где $q_{04} = \frac{q_4}{4}$, - масса, приходящаяся на одну колесную пару 4-осного вагона, т/ось.

Рассчитанное значение массы состава округляют до 50 т в меньшую сторону.

4. Чтобы выполнить проверку массы состава по длине приемо-отправочных путей, необходимо определить число вагонов в составе, длину поезда и сопоставить эту длину с заданной длиной приемо-отправочных путей станций.

Число вагонов в составе грузового поезда:

$$m_4 = \frac{Q}{q_4} \quad (4)$$

Полученные количества вагонов необходимо округлить до целых числовых значений в большую сторону.

Длина 4-осного вагона принимается равной 14 м. Длины локомотивов приведены в таблице 3. Общая длина поезда:

$$l_n = 14m_4 + l_l + 10, \quad (5)$$

где l_l – длина локомотива, м;

10 – запас длины на неточность установки поезда, м.

Проверка возможности установки поезда на приемо-отправочных путях выполняется по соотношению:

$$l_n \leq l_{non}, \quad (6)$$

где l_{non} – длина приемо-отправочных путей, м (таблица 1).

Если длина поезда меньше или равна длине приемо-отправочных путей станций заданного участка, то масса состава не корректируется и делается вывод о том, что массу состава уменьшать не надо.

Если же вычисленная длина поезда получилась больше длины приемо-отправочных путей, указанной в исходных данных, то масса состава уменьшается так, чтобы длина поезда равнялась длине приемо-отправочных путей на отдельных пунктах (при этом снова должны быть определены число вагонов в составе уменьшенной массы и соответствующая длина поезда и выполнено сопоставление последней с заданной длиной приемо-отправочных путей станций).

Таблица 3 – Расчетные параметры локомотивов

Серия локомотива	Расчетная сила тяги $F_{кр}$, Н	Расчетная скорость v_p , км/ч	Расчетная масса P , т	Конструкционная скорость $v_{констр}$, км/ч	Сила тяги при трогании $F_{ктр}$, Н	Длина локомотива $l_{л,м}$	Число движущихся колесных пар
2ТЭ116	496400	24,0	276	100	797550	36	12
2М62	400300	20,0	238	100	705000	34	12
3ТЭ10М	744000	23,5	414	100	1230000	51	18
2ТЭ10М	496400	23,5	276	100	797550	34	12
ВЛ8	456150	43,3	184	100	595450	28	8
ВЛ10	451250	46,7	184	100	614100	33	8
1,5ВЛ11	676900	46,7	276	100	921200	50	12
2ЭС5К	512000	37,7	192	100	727500	35	8
ВЛ80Р	502300	43,5	192	100	677650	33	8

Таблица 3а – Сила тяги локомотивов $F_k(v)$, кН

Скорость Серии локомотивов	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
2ТЭ116	680	585	417	320	241	210	190	160	145	130
2М62	600	400	280	210	170	150	125	115	100	80
3ТЭ10М	1020	867	605	460	375	305	270	245	210	190
2ТЭ10М	680	570	410	310	245	185	170	160	130	120
2ТЭ25К	690	607	480	360	288	240	208	180	160	144
ВЛ8	510	490	481	473	410	260	160	90	80	70
ВЛ10	524	502	485	470	456	400	270	200	150	115
1,5ВЛ11	786	753	727	705	685	580	400	300	235	170
ВЛ80Р	600	560	535	515	500	440	305	225	170	135
2ЭС5К	600	560	535	515	464	325	255	200	170	130

5. Для построения диаграммы удельных равнодействующих сил предварительно составляют таблицу для трех режимов ведения поезда по прямому горизонтальному пути:

а) для режима тяги $f_k - w_0 = f_1(v)$;

б) для режима холостого хода $w_{0x} = f_2(v)$;

в) для режима торможения:

при служебном регулировочном торможении $w_{0x} + 0,5b_T = f_3(v)$,

при экстренном торможении $w_{0x} + b_T = f_4(v)$.

Таблицу удельных равнодействующих сил, форма которой приведена ниже (таблица 5), заполняют для скоростей от 0 до конструкционной $v_{\text{констр}}$ через 10 км/ч.

Значение силы тяги для скоростей от 0 до конструкционной $v_{\text{констр}}$ приведены в таблице 3

Расчетную кривую тяговой характеристики заданного локомотива необходимо вычертить на миллиметровой бумаге и привести в работе.

Основное удельное сопротивление локомотива при движении под током w_0' определено по формуле (2), основное удельное сопротивление состава w_0'' по формуле (3). Числовые значения этих величин приведены в таблице 4 одинаковыми для всех вариантов.

Основное удельное сопротивление локомотива на холостом ходу (при движении без тока) определяют по формуле:

$$w_x = 2,4 + 0,011v + 0,0003v^2 \quad (7)$$

и его значения для разных скоростей приведены в таблице 4.

Удельные тормозные силы поезда в Н/кН вычисляют по формуле:

$$b_T = 1000\phi_{кр}\vartheta_p, \quad (8)$$

где $\phi_{кр}$ – расчетный коэффициент трения колодок о колесо.

При чугунных колодках:

$$\phi_{кр} = 0,27 \frac{v + 100}{5v + 100}; \quad (9a)$$

При композиционных колодках:

$$\phi_{кр} = 0,36 \frac{v + 150}{2v + 150}. \quad (9б)$$

(значения $\phi_{кр}$ подсчитываются или принимают по таблице 4 для всех скоростей, занесенных в таблицу 5);

Таблица 4 – Расчетные значения удельных основных сил сопротивления движению локомотива w'_0 , w_{0x} , состава w''_0 и коэффициентов трения $\phi_{кр}$ для чугунных и композиционных колодок

v , км/ч	w'_0 , Н/кН	w''_0 , Н/кН	w_x , Н/кН	$\phi_{кр}$, Чугунные	$\phi_{кр}$, Композиционные
0	1,9	0,9	2,4	0,27	0,36
10	2,1	0,95	2,55	0,198	0,34
20	2,2	1,0	2,76	0,162	0,32
30	2,4	1,1	3,05	0,140	0,31
40	2,8	1,25	3,4	0,126	0,297
50	3,15	1,35	3,83	0,116	0,288
60	3,58	1,5	4,32	0,108	0,28
70	4,07	1,7	4,89	0,102	0,273
80	4,62	1,9	5,52	0,097	0,267
90	5,23	2,1	6,23	0,093	0,262
100	5,9	2,3	7,00	0,09	0,257

ϑ_p – расчетный тормозной коэффициент состава в кН/кН:

$$\vartheta_p = \frac{\sum K_p}{Qg} = \frac{K_{p4}n_4}{Qg}, \quad (10)$$

где n_4 – число осей состава, $n_4 = 4m_4$;

K_{p4} — расчетные силы нажатия тормозных колодок на ось 4-осного вагона (при чугунных колодках $K_{p4}=68,5$ кН/ось, при композиционных колодках $K_{p4}=41,5$ кН/ось).

При определении расчетного тормозного коэффициента грузовых поездов на спусках до 20‰ масса и тормозные средства локомотива обычно не учитываются; это упрощает расчеты и не снижает их точность.

Удельная замедляющая сила, действующая на поезд на режиме торможения, Н/кН:

при служебном регулировочном торможении: $w_{0x} + 0,5b_T$;

при экстренном торможении: $w_{0x} + b_T$.

Все результаты вычислений вносят в таблицу 5. Значения $w'_0, w''_0, w_x, \phi_{кр}$ для различных скоростей берутся из таблицы 4. По данным этой таблицы следует построить по расчетным точкам диаграмму удельных равнодействующих сил для режима тяги $f_k - w_0 = f_1(v)$, режима холостого хода $w_{0x} = f_2(v)$ и режима служебного торможения $w_{0x} + 0,5b_T = f_3(v)$ (рисунок 5).

Диаграмму удельных равнодействующих сил рекомендуется вычертить на отдельном листе для того, чтобы в дальнейшем при построении кривой $v = f(s)$ ее можно было бы перемещать вдоль профиля.

При построении графических зависимостей следует пользоваться масштабами, приведенными в таблице 6.

Пользуясь построенной диаграммой для определенной массы состава и типа локомотива, можно анализировать условия и характер движения поезда на различных элементах профиля пути: определять равномерную скорость движения поезда на элементах различной крутизны, удельную равнодействующую силу на разных элементах в зависимости от скорости и т.д.

Таблица 5 – Таблица удельных равнодействующих сил

Режим тяги	v , км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	F_k , Н										
	w'_0 , Н/кН										
	$W'_0 = w'_0 P g$, Н										
	w''_0 , Н/кН										
	$W''_0 = w''_0 Q g$, Н										
	$W_0 = W'_0 + W''_0$, Н										
	$F_k - W_0$, Н										
	$\frac{F_k - W_0}{(P + Q)g} = f_k - w_0$										
Режим выбега	w_x , Н/кН										
	$W_x = w_x P g$, Н										
	$W_x + W''_0$, Н										
	$w_{0x} = \frac{W_x + W''_0}{(P + Q)g}$, Н/кН										
Режим торможения	$\phi_{кр}$										
	$b_T = 1000 \phi_{кр} \vartheta_p$, Н/кН										
	$w_{0x} + 0,5b_T$, Н/кН										
	$w_{0x} + b_T$, Н/кН										

Диаграмму удельных равнодействующих сил вычерчивают на миллиметровой бумаге, расчетные точки наносят на планшет заточенным карандашом четко, чтобы их положение было заметно.

6. Перед тем, как приступить к определению скорости и времени хода поезда по участку, следует решить **тормозную задачу**, которая состоит в определении

максимально допустимой скорости движения поезда по наиболее крутому спуску участка при заданных тормозных средствах и принятом тормозном пути. Эта задача в работе решается графическим способом.

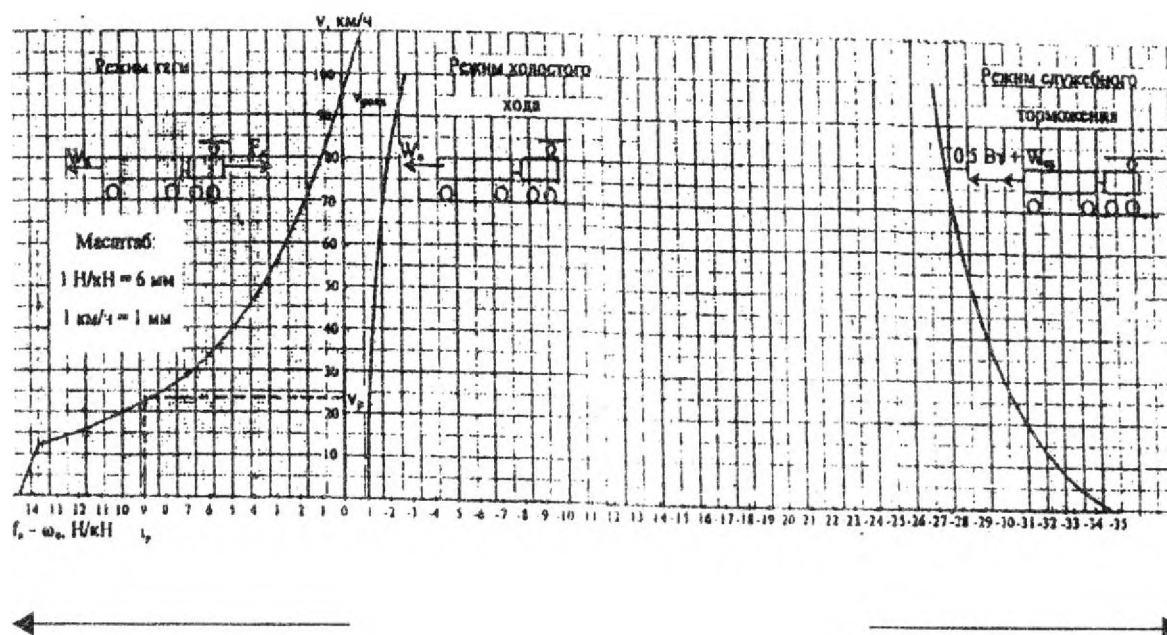


Рисунок 3 – Диаграмма удельных равнодействующих сил поезда

Таблица 6 – Масштабы для графических расчетов

Величины	Для общих расчетов		Для тормозных расчетов	
	1	2	3	4
Удельные силы 1 Н/кН= К, мм	6	10	1	2
Скорость 1 км/ч = т, мм	1	2	1	2
Путь 1 км = у, мм	20	48	120	240
Постоянная времени Δ, мм	30	25	—	—
Время 1 мин = х, мм	10	10	—	—

Полный (расчетный) тормозной путь:

$$s_T = s_{\Pi} + s_{Д}, \quad (11)$$

где s_{Π} – путь подготовки тормозов к действию, на протяжении которого тормоза поезда условно принимаются недействующими (от момента установки ручки крана машиниста в тормозное положение до включения тормозов поезда);

s_d – действительный тормозной путь, на протяжении которого поезд движется с действующими в полную силу тормозами (конец пути s_{Π} совпадает с началом пути s_d).

Равенство (11) позволяет искать допустимую скорость как величину, соответствующую точке пересечения графических зависимостей подготовительного пути s_{Π} и действительного тормозного пути s_d от скорости движения поезда на режиме торможения. Поэтому решают тормозную задачу следующим образом.

По данным расчетной таблицы удельных равнодействующих сил строят по точкам графическую зависимость удельных замедляющих сил при экстренном торможении от скорости $w_{0x} + b_T = f(v)$, а рядом, справа, устанавливают в соответствующих масштабах систему координат $v - s$ (рисунок 4). Оси скоростей v в обеих системах координат должны быть параллельны, а оси удельных сил $(w_{0x} + b_T)$ и пути s должны лежать на одной прямой. Масштабы для графических построений при тормозных расчетах следует выбирать из таблицы 6.

Решают тормозную задачу следующим образом. От точки O' вправо на оси s откладывают значение полного тормозного пути s_T , который следует принимать равным: на спусках крутизной до 6‰ включительно – 1000 м, на спусках круче 6‰ – 1200 м.

На кривой $w_{0x} + b_T = f(v)$ отмечают точки, соответствующие средним значениям скоростей выбранного скоростного интервала 10 км/ч (т.е. точки, соответствующие 5, 15, 25, 35 км/ч и т.д.). Через эти точки из точки M на оси $w_{0x} + b_T$, соответствующей крутизне самого крутого спуска участка (полюс построения), проводят лучи 1, 2, 3, 4 и т.д.

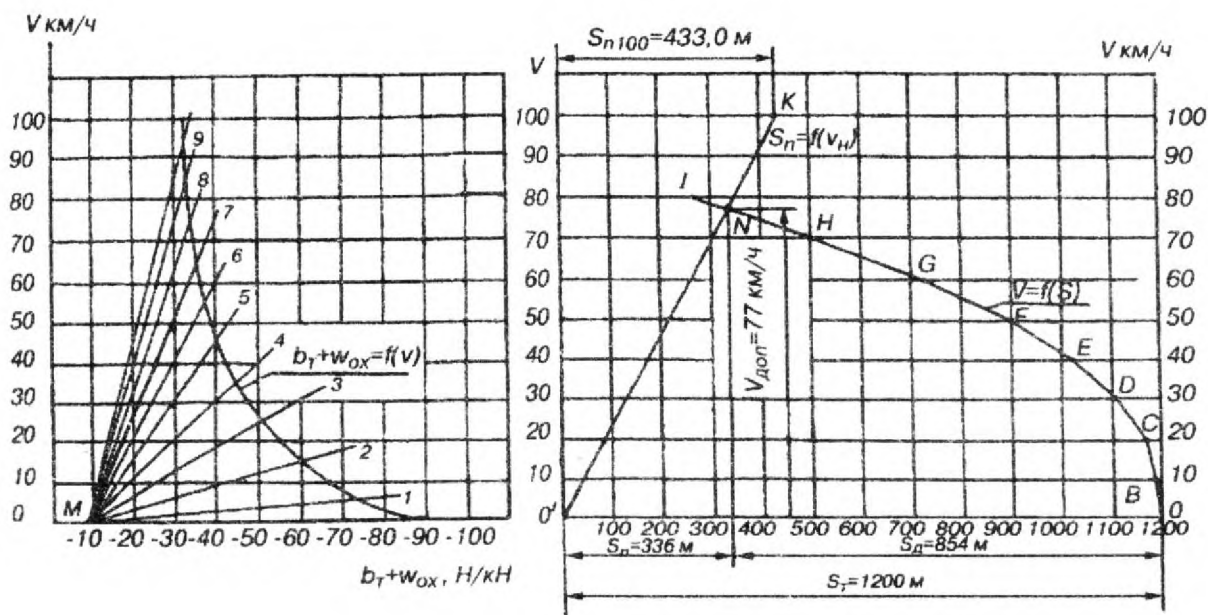


Рисунок 4 - Графическое решение тормозной задачи (точка М соответствует спуску -10‰)

Построение кривой $v = f(s)$ начинают из точки O , так как нам известно конечное значение скорости при торможении, равное нулю. Из этой точки проводят (с помощью линейки и угольника) перпендикуляр к лучу 1 до конца первого интервала, т.е. в пределах от 0 до 10 км/ч (отрезок OB). Из точки B проводят перпендикуляр к лучу 2 до конца второго скоростного интервала от 10 до 20 км/ч (отрезок BC); из точки C проводят перпендикуляр к лучу 3 и т.д. Начало каждого последующего отрезка совпадает с концом предыдущего. В результате получают ломаную линию, которая представляет собой выраженную графически зависимость скорости заторможенного поезда от пройденного пути (или, иначе говоря, зависимость пути, пройденного поездом на режиме торможения, от скорости движения).

На тот же график следует нанести зависимость подготовительного тормозного пути от скорости:

$$s_{\Pi} = 0,278v_n t_n, \quad (12)$$

где v_n — скорость в начале торможения, км/ч;

t_n — время подготовки тормозов к действию, с.

Время подготовки тормозов к действию для автотормозов грузового типа равно для составов длиной 200 осей и менее:

$$t_n = 7 - \frac{10i_c}{b_T},$$

для составов длиной от 200 до 300 осей:

$$t_{II} = 10 - \frac{15i_c}{b_T},$$

для составов длиной более 300 осей

$$t_{II} = 12 - \frac{18i_c}{b_T}.$$

где i_c – крутизна уклона, для которого решается тормозная задача (для спусков со знаком минус);

b_T – удельная тормозная сила при начальной скорости торможения v_n .

Построение зависимости подготовительного тормозного пути s_{II} от скорости производим по двум точкам, для чего подсчитываем значения s_{II} при $v_n = 0$ (в этом случае $s_{II} = 0$) и при $v_n = v_{\text{констр}}$.

Считают, что заторможенный поезд движется слева направо.

Графическую зависимость между s_{II} и v_n строят в тех же выбранных масштабах. Значение s_{II} , вычисленное для скорости, равной конструкционной скорости локомотива ($v_{\text{констр}}$ приведена в таблице 3), откладывают в масштабе (таблица 6) вправо от вертикальной оси $O'v$ на «уровне» той скорости, для которой подсчитывалось значение s_{II} (т.е. против скорости, равной $v_{\text{констр}}$). Получают точку K ; соединяют ее с точкой O' (так как при $v_n = 0$ имеем $s_{II} = 0$). Точка пересечения ломаной линии $OBCDEFGHIP$ с линией $O'K$ – точка N – определяет максимально допустимую скорость движения поезда на наиболее крутом спуске участка при

данном расчетном тормозном пути s_T . Полученные после решения тормозной задачи результаты следует указать в работе ($v_{\text{доп}} = \dots$ км/ч; $s_{\Pi} = \dots$ м; $s_{\text{Д}} = \dots$ м).

Для других уклонов, величины которых меньше того, по которому мы проводим решение тормозной задачи, предельно допустимые скорости движения находим, используя номограммы определения тормозных путей, приведенные в приложении и на которых проводятся графики зависимости тормозного пути от скорости, величины тормозного коэффициента поезда ϑ_p и типа колодок. При этом находим по графикам допустимые скорости для трёх значений уклона: для поезда с чугунными колодками для $i = -4\text{‰}$; -8‰ ; -12‰ , композиционных колодок для $i = -6\text{‰}$; -10‰ ; -16‰ . И строим график зависимости допустимой скорости $v_{\text{доп}}$ от уклона i_c , которым пользуемся для определения предельно допустимой скорости для уклона, на котором производится построение кривой скорости

Графическое решение тормозных задач и теоретическое обоснование графических способов решения подробно рассмотрены в [3; 10].

Результаты решения тормозной задачи необходимо учитывать при построении кривой скорости движения поезда $v = f(s)$ с тем, чтобы нигде не превысить скорости, допустимой по тормозам, т.е. чтобы поезд мог быть всегда остановлен на расстоянии, не превышающем длины полного тормозного пути.

7. Аналитическое интегрирование уравнения движения поезда.

Уравнение движения поезда определяет зависимость между ускорением и равнодействующей приложенных к поезду сил:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \xi(f_k - w_k - b_T), \quad (13)$$

где $\xi = 120$ – коэффициент уравнения движения поезда с учетом поправки на силы инерции вращающихся масс;

$f_k - w_k - b_T$ – удельная сила, действующая на поезд, Н/кН.

Интегрирование уравнения движения поезда позволяет найти зависимость между скоростью v , временем t и пройденным расстоянием s .

В инженерной практике уравнение движения поезда обычно интегрируют, пользуясь методом конечных приращений скорости $\Delta v = v_{n+1} - v_n$. В пределах этих приращений величина равнодействующей силы принимается постоянной и соответствующей средней скорости $v_{\text{ср}}$ интервалов. Следовательно, кривая удельных равнодействующих сил заменяется ступенчатой кривой [2, рисунок 47].

$$t = \frac{v_k - v_n}{2(f_k - w_0 - b_T)_{\text{ср}}}, \quad (14)$$

$$s = \frac{4,17(v_k^2 - v_n^2)}{(f_k - w_0 - b_T)_{\text{ср}}}, \quad (15)$$

где v_n – начальная скорость выбранного интервала скоростей, км/ч;

v_k – конечная скорость интервала, км/ч;

$(f_k - w_0 - b_T)_{\text{ср}}$ – численное значение равнодействующей удельной силы, приложенной к поезду при средней скорости интервала (берется по диаграмме удельных равнодействующих сил).

Под равнодействующей удельных сил $(f_k - w_0 - b_T)_{\text{ср}}$ следует понимать разность удельных сил, действующих на поезд.

Эта разность в режиме тяги при движении по ровному горизонтальному пути представляет собой $(f_k - w_0)_{\text{ср}}$ при средней скорости интервала изменения скорости. Ее находят по постоянной диаграмме удельных сил для средних скоростей интервалов. При движении по подъему в режиме тяги она будет иметь вид $(f_k - w_0 - i)_{\text{ср}}$ (i – удельное сопротивление от подъема, численно равное числу тысячных подъема).

При движении по спуску, наоборот, к разности $(f_k - w_0)_{\text{ср}}$ нужно прибавить удельную силу, создаваемую при спуске за счет составляющей веса поезда т.е. $(f_k - w_0 + i_c)_{\text{ср}}$.

В режиме холостого хода (выбега) сила тяги отсутствует и удельные равнодействующие силы будут иметь вид: $(-w_{0x} \pm i)_{\text{ср}}$, а в режиме торможения: $(-w_{0x} \pm i - b_T)_{\text{ср}}$.

Студенту следует учитывать эти изменения (элементов профиля и режимов движения), при расчете проходимого пути и времени в интервалах скоростей.

Для примера приведен расчет времени хода поезда по участку, состоящему из четырех элементов:

- площадка длиной 1000 м;
- спуск (3‰) длиной 800 м;
- подъем (9‰) длиной 3500 м;
- спуск (12‰) длиной 5000 м.

Равнодействующие удельные силы для режимов тяги, холостого хода и торможения берем из диаграммы удельных равнодействующих сил (рис.3) при средних скоростях интервалов.

Наибольшая допустимая скорость движения грузовых поездов согласно ПТЭ 90 км/ч.

Определим время хода поезда по участку от момента трогания до прохода подъемом последнего четвертого элемента участка.

Первый элемент участка:

$$s_1 = 1000 \text{ м}; i_1 = 0.$$

В интервале $v = 0 \div 10$ км/ч по диаграмме удельных равнодействующих сил (рисунок 3) в режиме тяги при средней скорости 5 км/ч:

$$\begin{aligned}(f_k - w_0)_{\text{ср}} &= 14,25 \text{ Н/кН}; \\ t_1 &= \frac{10 - 0}{2 \cdot 14,25} = 0,35 \text{ мин}, \\ s_1 &= \frac{4,17(10^2 - 0^2)}{14,25} \approx 30 \text{ м},\end{aligned}$$

$$v = 10 \div 20 \text{ км/ч}; (f_k - w_0)_{\text{ср}} = 12 \text{ Н/кН};$$

$$t_2 = \frac{20 - 10}{2 \cdot 12} = 0,4 \text{ мин},$$

$$s_2 = \frac{4,17(20^2 - 10^2)}{12} = 104 \text{ м},$$

$$v = 20 \div 30 \text{ км/ч}; (f_k - w_0)_{\text{ср}} = 8 \text{ Н/кН}$$

$$t_3 = \frac{30 - 20}{2 \cdot 8} = 0,62 \text{ мин},$$

$$s_3 = \frac{4,17(30^2 - 20^2)}{8} = 260 \text{ м},$$

$$v = 30 \div 40 \text{ км/ч}; (f_k - w_0)_{\text{ср}} = 5,8 \text{ Н/кН}$$

$$t_4 = \frac{40 - 30}{2 \cdot 8} = 0,86 \text{ мин},$$

$$s_4 = \frac{4,17(40^2 - 30^2)}{8} = 503 \text{ м},$$

Пройденный путь до достижения поездом скорости 40 км/ч:

$$s_1 + s_2 + s_3 + s_4 = 30 + 104 + 260 + 503 = 897 \text{ м}.$$

До перехода на спуск осталось $1000 - 897 = 103 \text{ м}$. Методом подбора найдем повышение скорости, при котором поезд проходит оставшиеся 103 м:

$$v = 40 \div 41,5 \text{ км/ч}; (f_k - w_0)_{\text{ср}} = 4,9 \text{ Н/кН}$$

$$t_5 = \frac{41,5 - 40}{2 \cdot 4,9} = 0,2 \text{ мин},$$

$$s_5 = \frac{4,17(41,5^2 - 40^2)}{4,9} = 103 \text{ м.}$$

Второй элемент участка:

$$s_2 = 800 \text{ м}; i_2 = -3 \text{ ‰}.$$

В интервале от 41,5 до 50 км/ч:

$$(f_k - w_0 + i_c)_{\text{ср}} = 4 + 3 = 7 \text{ Н/кН};$$

$$t_6 = \frac{50 - 41,5}{2 \cdot 7} = 0,6 \text{ мин},$$

$$s_6 = \frac{4,17(50^2 - 41,5^2)}{7} = 463 \text{ м.}$$

Оставшиеся 337 м поезд проследует при повышении скорости с 50 до 55 км/ч (опять подбором).

$$(f_k - w_0 + i_c)_{\text{ср}} = 3,4 + 3 = 6,4 \text{ Н/кН};$$

$$t_7 = \frac{55 - 50}{2 \cdot 6,4} = 0,4 \text{ мин},$$

$$s_7 = \frac{4,17(55^2 - 50^2)}{6,4} = 340 \text{ м.}$$

Третий элемент участка:

$$s_3 = 3500 \text{ м}; i_3 = 9 \text{ ‰}.$$

На этом элементе удельная равнодействующая сила в режиме тяги отрицательна, т.е. скорость будет снижаться. Для средней скорости 50 км/ч в интервале от 55 до 45 км/ч:

$$(f_k - w_0 - i)_{\text{ср}} = 3,8 - 9 = -5,2 \text{ Н/кН};$$

$$t_8 = \frac{45 - 55}{-2 \cdot 5,2} = 0,96 \text{ мин},$$

$$s_8 = \frac{4,17(45^2 - 55^2)}{-5,2} = 802 \text{ м},$$

$$v = 45 \div 35 \text{ км/ч}; (f_k - w_0 - i)_{\text{ср}} = 5,0 - 9 = -4,0 \text{ Н/кН};$$

$$t_9 = \frac{35 - 45}{-2 \cdot 4} = 1,25 \text{ мин},$$

$$s_9 = \frac{4,17(35^2 - 45^2)}{-4} = 1250 \text{ м},$$

Следующий интервал скорости берем от 35 км/ч до расчетной скорости $v_p = 23,5 \text{ км/ч}$:

$$(f_k - w_0 - i)_{\text{ср}} = 6,7 - 9 = -2,3 \text{ Н/кН};$$

$$t_{10} = \frac{23,5 - 35}{-2 \cdot 2,3} = 2,5 \text{ мин},$$

$$s_{10} = \frac{4,17(23,5^2 - 35^2)}{-2,3} = 1220 \text{ м},$$

Итого пройденное расстояние по подъему крутизной 9 ‰ составило 3272 м.

При расчетной скорости $v_p = 23,5 \text{ км/ч}$ равнодействующая удельных сил:

$$(f_k - w_0 - i)_{\text{cp}} = 9 - 9 = 0.$$

Поезд движется равномерно до конца 9 ‰-го подъема:

$$s_{11} = 3500 - 3272 = 228 \text{ м},$$

$$t_{11} = \frac{0,228 \cdot 60}{23,5} = 0,58 \text{ мин.}$$

Четвертый элемент участка:

$$s_4 = 5000 \text{ м}; i_4 = -12 \text{ ‰}.$$

Ускоряющая сила увеличивается, скорость растет.

$$v = 23,5 \div 30 \text{ км/ч}; (f_k - w_0 + i_c)_{\text{cp}} = 7,5 + 12 = 19,5 \text{ Н/кН};$$

$$t_{12} = \frac{30 - 23,5}{2 \cdot 19,5} = 0,16 \text{ мин},$$

$$s_{12} = \frac{4,17(35^2 - 23,5^2)}{19,5} = 118 \text{ м},$$

$$v = 30 \div 40 \text{ км/ч}; (f_k - w_0 + i_c)_{\text{cp}} = 5,8 + 12 = 17,8 \text{ Н/кН};$$

$$t_{13} = \frac{40 - 30}{2 \cdot 17,8} = 0,28 \text{ мин},$$

$$s_{13} = \frac{4,17(40^2 - 30^2)}{17,8} = 164 \text{ м},$$

$$v = 40 \div 50 \text{ км/ч}; (f_k - w_0 + i_c)_{\text{cp}} = 4,1 + 12 = 16, \text{ Н/кН};$$

$$t_{14} = \frac{50 - 40}{2 \cdot 16,1} = 0,3 \text{ мин},$$

$$s_{14} = \frac{4,17(50^2 - 40^2)}{16,1} = 233 \text{ м},$$

$$v = 50 \div 60 \text{ км/ч}; (f_k - w_0 + i_c)_{\text{ср}} = 2,8 + 12 = 14,8 \text{ Н/кН};$$

$$t_{15} = \frac{60 - 50}{2 \cdot 14,8} = 0,34 \text{ мин},$$

$$s_{15} = \frac{4,17(60^2 - 50^2)}{14,8} = 253 \text{ м},$$

$$v = 60 \div 70 \text{ км/ч}; (f_k - w_0 + i_c)_{\text{ср}} = 2,1 + 12 = 14,1 \text{ Н/кН};$$

$$t_{16} = \frac{70 - 60}{2 \cdot 14,1} = 0,35 \text{ мин},$$

$$s_{16} = \frac{4,17(70^2 - 60^2)}{14,1} = 384 \text{ м},$$

Допустимая скорость по тормозам на крутом спуске $v_{\text{доп}} = 77 \text{ км/ч}$ (рисунок 4). Выключаем тяговые двигатели, достигнув скорости 70 км/ч , и продолжаем двигаться на холостом ходу до скорости 77 км/ч :

$$v = 70 \div 77 \text{ км/ч}; (-w_{0x} + i)_{\text{ср}} = -1,9 + 12 = 10,1 \text{ Н/кН};$$

$$t_{17} = \frac{77 - 70}{2 \cdot 10,1} = 0,346 \text{ мин},$$

$$s_{17} = \frac{4,17(77^2 - 70^2)}{10,1} = 420 \text{ м},$$

Скорость достигла максимально допустимой – 77 км/ч . Необходимо произвести служебное торможение, снизив скорость до 60 км/ч . Используем

кривую служебного торможения диаграммы удельных равнодействующих сил (рисунок 3).

$$v = 77 \div 70 \text{ км/ч}; (-w_{0x} - 0,5b_T + i)_{\text{ср}} = -27,5 + 12 = -15,5 \text{ Н/кН};$$

$$t_{18} = \frac{70 - 77}{-2 \cdot 15,5} = 0,22 \text{ мин},$$

$$s_{18} = \frac{4,17(70^2 - 77^2)}{-15,5} = 277 \text{ м},$$

$$v = 70 \div 60 \text{ км/ч}; (-w_{0x} - 0,5b_T + i)_{\text{ср}} = -28 + 12 = -16 \text{ Н/кН};$$

$$t_{19} = \frac{60 - 70}{-2 \cdot 16} = 0,3 \text{ мин},$$

$$s_{19} = \frac{4,17(60^2 - 70^2)}{-16} = 339 \text{ м},$$

Отпустив тормоза, движемся на холостом ходу:

$$v = 60 \div 70 \text{ км/ч}; (\omega_{0x} + i_c) = -1,6 + 12 = 10,4 \text{ Н/кН};$$

$$t_{20} = \frac{70 - 60}{2 \cdot 10,4} = 0,48 \text{ мин},$$

$$s_{20} = \frac{4,17(70^2 - 60^2)}{10,4} = 677 \text{ м},$$

$$v = 70 \div 77 \text{ км/ч}; (-w_{0x} + i)_{\text{ср}} = -1,9 + 12 = 10,1 \text{ Н/кН};$$

$$t_{21} = \frac{77 - 70}{2 \cdot 10,1} = 0,346 \text{ мин},$$

$$s_{21} = \frac{4,17(77^2 - 70^2)}{10,1} = 339 \text{ м},$$

Суммируем пройденный путь по спуску: $S = 3285$ м.

Оставшийся путь по спуску ($5000 - 3285 = 1715$ м) пройдем со скоростью 77 км/ч, поддерживаемой регулировочным торможением.

$$S_{22} = 1715 \text{ м},$$
$$t_{22} = \frac{1,715 \cdot 60}{77} = 1,3 \text{ мин.}$$

Результаты расчетов заносим в таблицу 7.

Далее, пользуясь данными этих расчетов, строим графические зависимости $v(s)$ и $t(v)$, используя масштабы вариантов 1 или 2 из таблицы 6.

Техническая скорость поезда на заданном участке:

$$v_T = \frac{s}{t} \cdot 60 = \frac{10,3 \cdot 60}{13,1} = 47 \frac{\text{км}}{\text{ч}}.$$

Таблица 7 – Сводная таблица результатов расчётов

Параметры элемента	Скоростной интервал	v_1 , км/ч	v_2 , км/ч	$(f_k \pm w_k - b_T)_{cp}$, Н/кН	Δt_i , мин	$t = \sum \Delta t$, мин	ΔS_i , м	$S =$ $\sum \Delta S$, м	Режим работы локомотивов
I $S_1 = 1000\text{м}$ $i_1 = 0\text{‰}$	1	0	10	14,2	0,35	2,43	30	1000	Режим тяги
	2	10	20	12	0,4		104		То же
	3	20	30	8	0,62		260		-//-
	4	30	40	5,8	0,86		503		-//-
	5	40	41,5	4,9	0,2		103		-//-
II $S_2 = 800\text{м}$ $i_2 = -3\text{‰}$	6	41,5	50	4+3=7	0,6	1,0	463	805	Режим тяги
	7	50	55	3,4+3=6,4	0,4		342		То же
III $S_3 = 3500\text{м}$ $i_3 = 0\text{‰}$	8	55	45	3,8-9=-5,2	0,96	5,29	802	3500	Режим тяги
	9	45	35	5,0-9=-4,0	1,25		1250		То же
	10	35	23,5	6,7-9=-2,3	2,5		1220		-//-
	11	23,5	23,5	9-9=0	0,58		228		-//-
IV $S_4 = 5000\text{м}$ $i_4 = -12\text{‰}$	12	23,5	30	7,5+12=19,5	0,16	4,4	118	1622	Режим тяги
	13	30	40	5,8+12=17,8	0,28		164		То же
	14	40	50	4,1+12=16,1	0,3		233		-//-
	15	50	60	2,8+12=14,8	0,34		253		-//-
	16	60	70	2,1+12=14,1	0,35		384		-//-
	17	70	77	1,3+12=13,3	0,375		470		-//-
	18	77	70	-27,5+12=15,5	0,32		403		Служ.
	19	70	60	-28+12=16	0,3		339		тормож
	20	60	70	-1,6+12=10,4	0,48		677		Режим х.х.
	21	70	77	-1,9+12=10,1	0,34+1,3		1715		-//-

8. Расчет времени хода поезда способом установившихся скоростей.

Расчеты времени хода аналитическим интегрированием уравнения движения поезда или графическим способом очень трудоемки.

В случае необходимости проведения срочных расчетов, когда не требуется их большая точность, используют способ установившихся скоростей, который предполагает следующие допущения:

- скорость движения в пределах элемента спрямленного профиля пути постоянна и равна установившейся;
- при переходе с одного элемента профиля на другой скорость движения поезда меняется мгновенно.

Установившаяся скорость определяется по диаграмме удельных равнодействующих сил. В случае затяжных уклонов большой величины, на которых невозможно установление значения установившейся скорости указанным образом за установившуюся скорость движения назначают скорости, полученные при решении тормозной задачи.

Время движения по каждому элементу профиля пути при этом определится по формуле:

$$t_i = \frac{60 \cdot s_i}{v_{\text{равн}i}} \quad (16)$$

Для определения времени хода по перегону суммируют значения t_i каждого элемента профиля, добавляют время на разгон поезда – $t_{\text{раз}}$ и замедления поезда – $t_{\text{зам}}$. Обычно в расчетах принимается: $t_{\text{раз}} = 2$ мин, $t_{\text{зам}} = 1$ мин. Все расчеты сводятся в таблицу 10.

Таблица 10 – Расчёт времени хода поезда приближённым методом

№ элемента профиля пути	Длина элемента s_i , м	Уклон i_i , ‰	Установившаяся скорость $v_{\text{равн}i}$, км/ч	Время прохождения элемента t_i , мин	Поправка на разгон $t_{\text{раз}}$, и замедление $t_{\text{зам}}$, мин
1	s_1	i_1	$v_{\text{равн}1}$	t_1	$t_{\text{раз}} = 2$
2	s_2	i_2	$v_{\text{равн}2}$	t_2	
...	...	...	...		
N	s_N	i_N	$v_{\text{равн}N}$	t_N	$t_{\text{зам}} = 1$
				$\sum t_i$	$t_{\text{раз}} + t_{\text{зам}}$

По данным таблицы 10 рассчитываем время хода поезда по участку:

$$t_x^{\text{прибл}} = \sum t_i + t_{\text{раз}} + t_{\text{зам}}. \quad (17)$$

Далее рассчитываем техническую скорость поезда по участку:

$$v_T^{\text{прибл}} = \frac{\sum s_i}{t_x^{\text{прибл}}} \cdot 60. \quad (18)$$

Рассчитанную приближенным способом величину скорости сравниваем с полученным нами ранее точным значением этого параметра и оцениваем процент погрешности приближенного способа:

$$\delta = \frac{v_T - v_T^{\text{прибл}}}{v_T} \cdot 100. \quad (19)$$

В заключении этого раздела делается вывод о возможности использования приближенных методов расчета времени хода и технической скорости поезда.

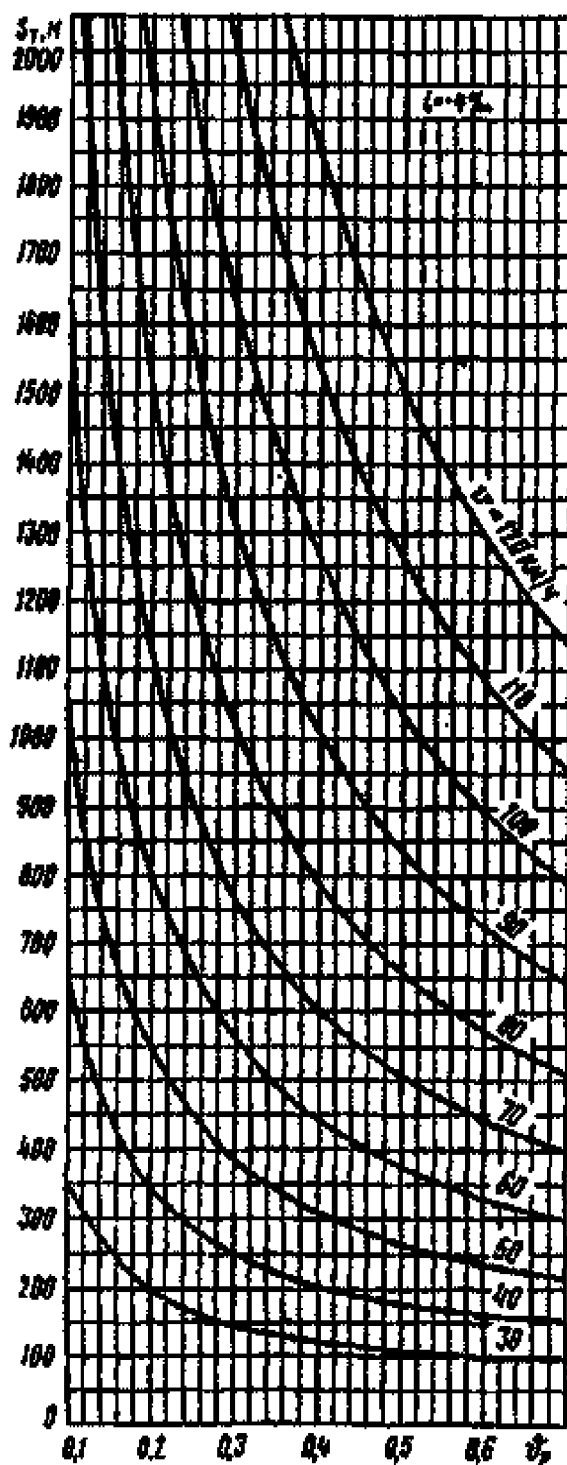


Рис.П1. Тормозной путь грузового поезда при экстренном торможении на спуске $i = -4 ‰$

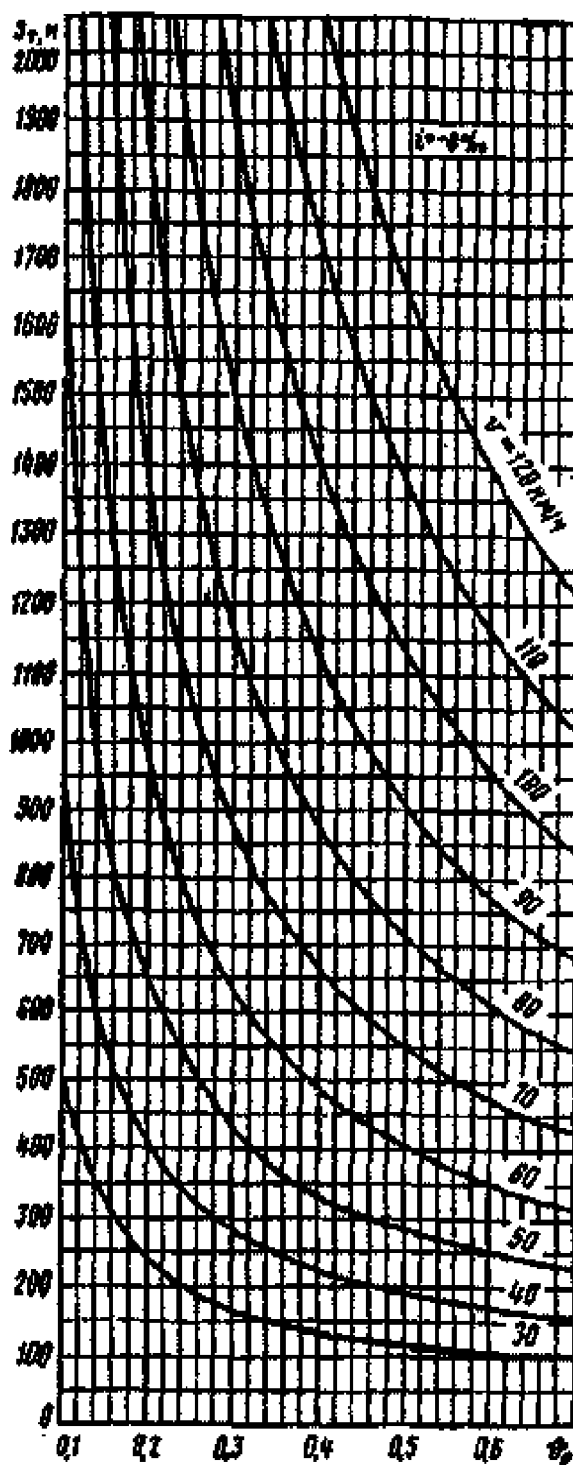


Рис.П2. Тормозной путь грузового поезда при экстренном торможении на спуске $i = -8 ‰$

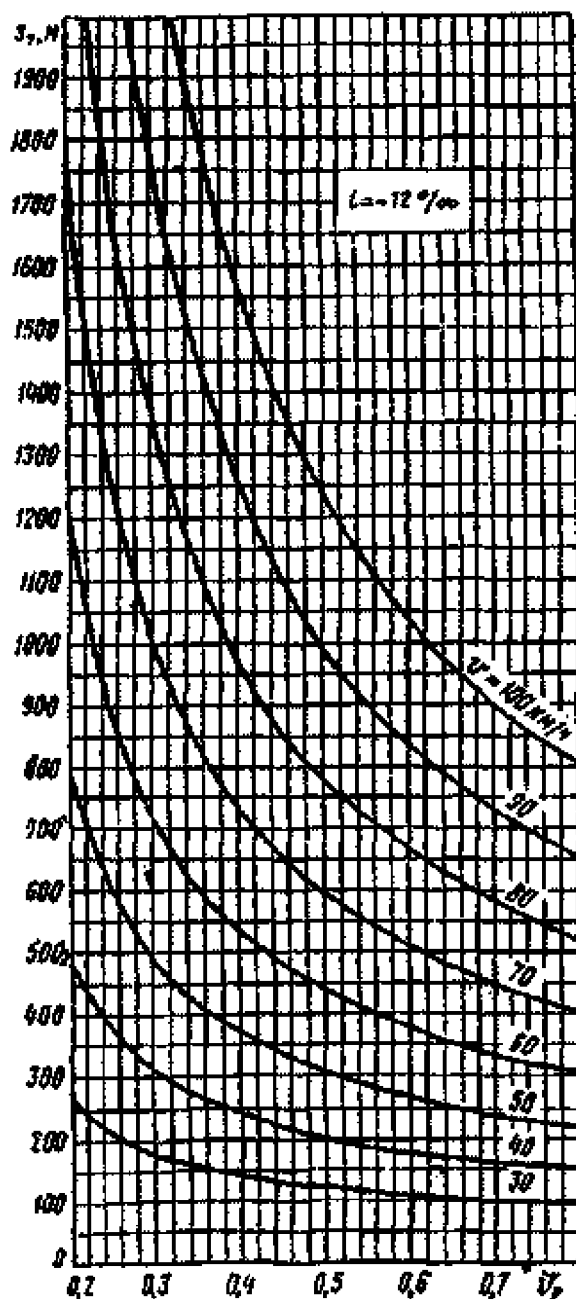


Рис.П3. Тормозной путь грузового поезда при экстренном торможении на спуске $i = -12 \text{ ‰}$ (колодки чугунные стандартные)

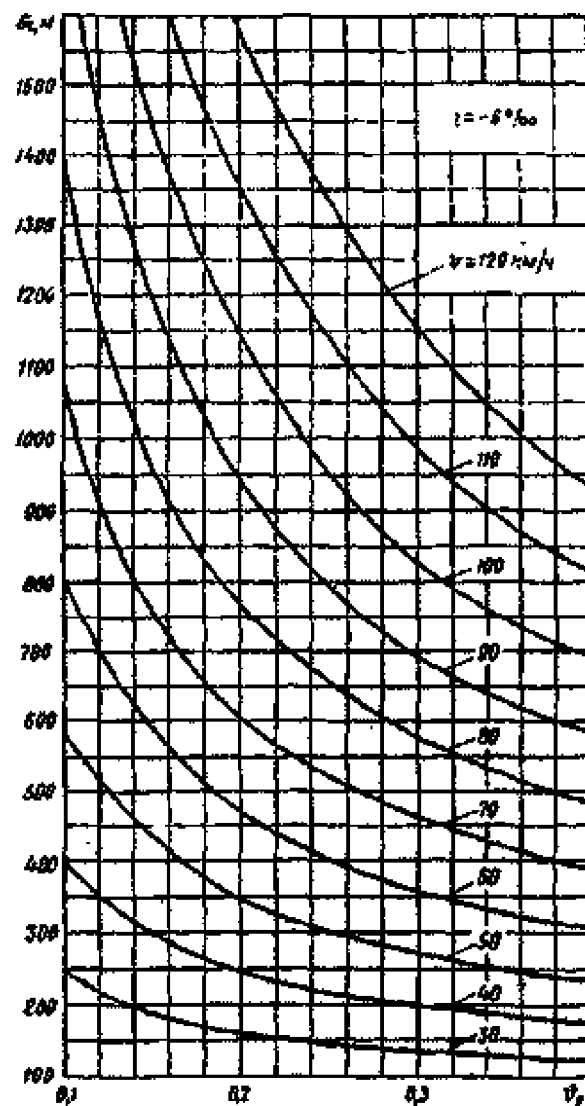


Рис.П4. Тормозной путь грузового поезда при экстренном торможении на спуске $i = -6 \text{ ‰}$ (колодки композиционные)

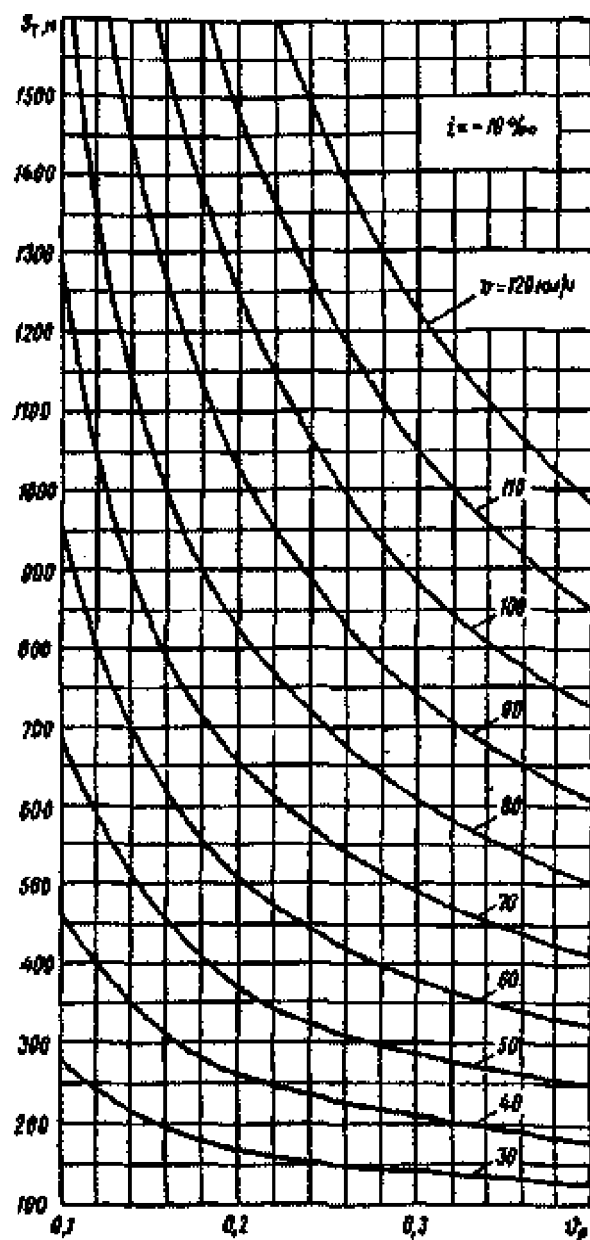


Рис.П5. Тормозной путь грузового поезда при экстренном торможении на спуске $i = -10\text{‰}$ (колодки композиционные)

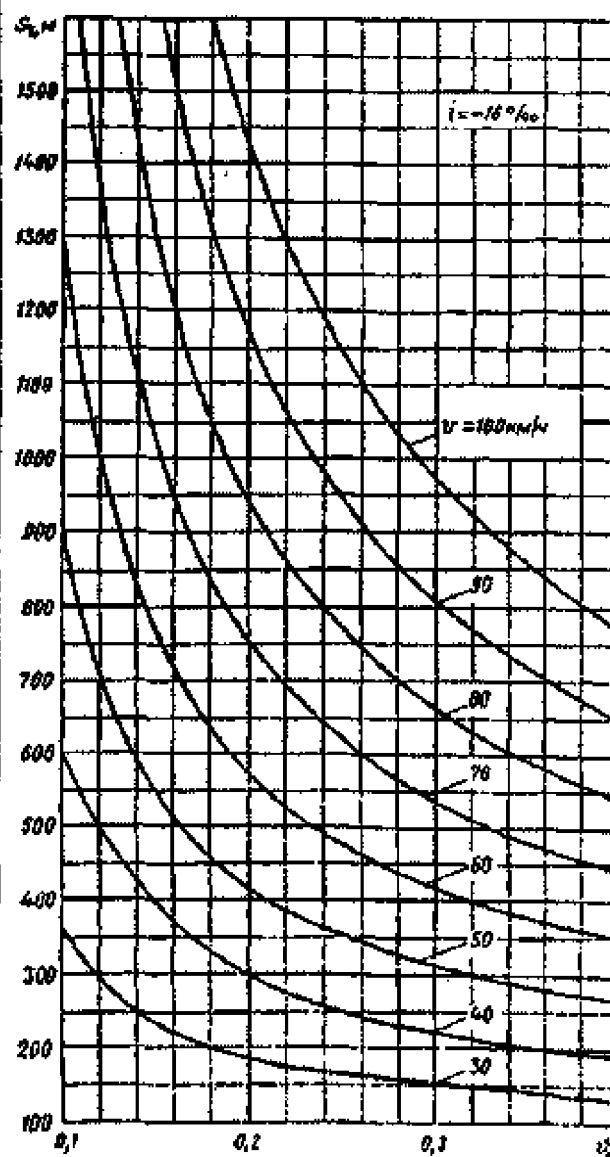


Рис.П6. Тормозной путь грузового поезда при экстренном торможении на спуске $i = -16\text{‰}$ (колодки композиционные)